世界电子科学史

高鼎三／主编

自然科学史丛书

世界电子科学史

高鼎三／主编

I-091

吉林教育出版社

（吉）新登字 02 号

丛书编辑委员会

主编 杜石然

编委 （按姓氏笔划为序）

白国才　汪子春　杜石然　吴凤鸣

杨文衡　董光璧　崔振华　潘吉星

自然科学史丛书

世界电子科学史　　高鼎三　主编

责任编辑：郜迪新　　封面设计：王劲涛

出版：吉林教育出版社　850×1168 毫米 32 开本　14 印张 6 插页　344000 字

1998 年 12 月第 1 版　1998 年 12 月第 1 次印刷

发行：吉林教育出版社　印数：1—1000 册　定价：23.00 元

印刷：吉林电力职工大学印刷厂　ISBN 7-5383-3673-7/G・3313

第一篇　无线电与电子技术

第一章　无线电的发明……（1）
1.1　无线电发明前的简易通信和电通信 ……（1）
1. 最简单的通信方式……（1）
2. 有线电报 ……（2）
3. 有线电话 ……（7）
1.2　著名的麦克斯韦方程组和麦克斯韦的预言 ……（12）
1. 天才数学家麦克斯韦 ……（12）
2. 麦克斯韦与法拉第……（16）
3. 位移电流和麦克斯韦方程 ……（18）
1.3　电磁波确实存在 ……（20）
1. 真理却难露头 ……（20）
2. 赫兹实验 ……（21）
1.4　波波夫的雷电指示器 ……（24）
1. 为创立早期无线电接收机而努力的人们 ……（24）
2. 波波夫的接收机和第一根天线 ……（27）
1.5　马可尼的早期收发报机 ……（30）
第二章　无线电通信和无线电广播……（32）
2.1　早期的无线电通信 ……（32）
1. 两种不同遭遇 ……（32）
2. 横跨大西洋的无线电发送设备 ……（37）
2.2　无线电发送设备的发展过程 ……（40）
1. 大功率源 ……（41）
2. 高频放大 ……（45）
3. 调幅无线电发射机……（47）
4. 稳频 ……（50）
5. 单边带通信 ……（52）

6. 调频发射机与调频广播 …… (55)
2.3 接收机 …… (57)
第三章 电波传播与天线 …… (59)
3.1 电波传播理论的发展 …… (59)
1. 地波的传播 …… (60)
2. 无线电波的对流层传播 …… (63)
3. 无线电波的电离层传播 …… (68)
3.2 天线技术 …… (72)
1. 早期的无线电报天线 …… (72)
2. 长波和中波天线 …… (73)
3. 短波广播天线 …… (75)
4. 电视天线 …… (76)
5. 微波和雷达天线 …… (78)
第四章 微波通信与雷达 …… (80)
4.1 微波通信 …… (80)
1. 微波技术及主要用途 …… (80)
2. 微波通信发展过程 …… (81)
3. 现代微波通信概况 …… (83)
4.2 雷达 …… (84)
1 早期的雷达 …… (84)
2. 二战推动了雷达加速发展 …… (85)
3. 现代雷达 …… (87)
第五章 电视与电视广播 …… (90)
5.1 机械式电视 …… (90)
5.2 电子电视 …… (97)
第六章 现代通信 …… (102)
6.1 传统通信方式所面临的问题 …… (102)
6.2 数字通信 …… (103)

1. 数字通信的优点 …… (103)
2. 计算机通信 …… (104)
3. 数字通信网 …… (105)
6.3 卫星通信 …… (106)
1. 卫星通信系统 …… (108)
2. 卫星通信的发展 …… (111)
6.4 激光通信 …… (111)
1. 卫星间的激光通信 …… (112)
2. 对潜激光通信 …… (114)
3. 飞机间激光通信 …… (115)
4. 光纤通信 …… (115)

第二篇　半导体的发展

第一章　发明晶体管前的回顾 …… (118)
第二章　晶体管的发明 …… (121)
2.1 晶体管研究工作的开始 …… (121)
2.2 贝尔研究所的研究工作 …… (122)
2.3 晶体管的诞生 …… (125)
2.4 晶体管工艺技术的发展 …… (129)
2.5 平面工艺的出台 …… (133)
第三章　集成电路的出现 …… (137)
3.1 集成电路的研究 …… (137)
3.2 MOSFET 的实现 …… (140)
3.3 集成电路工艺的进一步发展 …… (143)
第四章　超大规模集成电路 …… (146)
4.1 集成电路的分类 …… (146)
4.2 特种存储器 …… (148)
1. 扩展数据输出的动态随机存储器 (EDODRAM) …… (149)

2. 图象随机存储器（VRAM） …… (150)
3. 窗口随机存储器（WRAM） …… (151)
4. 集成画面缓冲器（IFB） …… (151)
5. 同步动态随机存储器（Synchronous DRAM） …… (152)
6. 同步图形随机存储器（SGRAM） …… (152)
7. 超高速缓冲动态随机存储器（Cached DRAM） …… (153)
8. 三重端口动态随机存储器（Triple Port DRAM） …… (153)
9. RAMBUS DRAM（RDRAM） …… (154)
10. 同步图象随机存储器（SVRAM） …… (154)
11. 增强性 DRAM（Enhanced DRAM） …… (154)
12. 随机存储器环（RAMLINK） …… (155)
13. MOSYS（MOST） …… (155)
4.3 专用集成电路（ASIC） …… (155)
第五章 多媒体技术的发展 …… (158)
5.1 什么是多媒体技术 …… (158)
5.2 多媒体技术的发展过程 …… (158)
5.3 多媒体产品及其应用 …… (163)
第六章 其他半导体器件的发展 …… (165)
6.1 半导体功率器件 …… (165)
6.2 半导体微波器件 …… (169)
6.3 半导体敏感器件 …… (173)
1. 半导体光传感器 …… (174)
2. 半导体磁敏器件 …… (178)
3. 半导体力学量敏感器件 …… (180)
4. 半导体温度敏感器件 …… (183)
5. 半导体气敏器件 …… (185)
6. 半导体湿敏器件 …… (187)
7. 其他半导体敏感器件 …… (189)

第七章　半导体材料…… (191)
7.1　半导体材料的特点 …… (191)
7.2　元素半导体材料 …… (194)
7.3　化合物半导体材料 …… (199)
1. Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体 …… (199)
2. Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体 …… (205)
7.4　其他半导体材料 …… (206)
1. 非晶态半导体 …… (206)
2. 磁性半导体 …… (210)
3. 有机半导体 …… (211)
第八章　半导体超晶格…… (213)
8.1　什么是超晶格 …… (213)
8.2　半导体超晶格类型 …… (215)
1. 组分超晶格 …… (215)
2. 掺杂超晶格 …… (217)
8.3　半导体超晶格结构的特征与效应 …… (217)
1. 载流子迁移率的提高 …… (218)
2. 隧道效应 …… (219)
3. 状态密度 …… (219)
4. 异质结面中载流子的实空间跃迁 …… (219)
5. 量子阱中激子的稳定化 …… (220)
6. 半导体超晶格材料的金属化 …… (220)
8.4　半导体超晶格的应用 …… (221)
1. 超晶格在传感器方面的应用 …… (221)
2. 高电子迁移率晶体管（HEMT） …… (223)
3. 量子阱激光器 …… (223)
4. 电调制发光波长的器件 …… (225)
8.5　应变超晶格 …… (225)

1. 应变超晶格的设计基础 …… (226)
2. 各种应变超晶格的研究动向 …… (227)
8.6 非晶态超晶格 …… (230)
8.7 超晶格结构的发展趋势 …… (232)
第九章 超导体 …… (242)
第十章 进入超晶格时代 …… (249)

第三篇 计算机技术

第一章 电子计算机出现之前的计算工具 …… (257)
1.1 算盘 …… (257)
1.2 欧洲出现的两种计算器 …… (258)
1.3 差分机 …… (260)
1.4 分析机——现代通用数字机的雏型 …… (262)
1.5 模拟机 …… (264)
第二章 早期的电子计算机 …… (267)
2.1 机电计算机 …… (267)
2.2 第一台电子计算机——ENIAC …… (268)
2.3 EDVAC 的研制 …… (271)
2.4 普林斯顿高级研究所与 IAS 计算机 …… (272)
第三章 20 世纪 50 年代的计算机 …… (274)
3.1 由军用开始转向民用 …… (275)
3.2 计算机开始工业化批量生产 …… (276)
3.3 计算机在 20 世纪 50 年代对科技方面的作用 …… (280)
1. 航空与航天技术 …… (281)
2. 核武器的研制 …… (281)
3. 气象预报 …… (281)
3.4 计算机进入企业经营管理 …… (282)

第四章　20 世纪 60 年代电子计算机的发展 …… (284)
4.1　第二代计算机及 IBM 系列 …… (285)
4.2　IBM 1401 系列小型机的推广 …… (287)
4.3　Stretch 和 CDC 6600 高速大型计算机 …… (288)
4.4　第三代计算机 …… (293)
4.5　计算机联网 …… (296)
第五章　20 世纪 70 年代与 80 年代初电子计算机的发展
…… (298)
5.1　第四代计算机 …… (298)
5.2　通用计算机的渐进发展 …… (299)
5.3　巨型计算机的出现 …… (303)
5.4　小型计算机迅猛发展 …… (308)
5.5　微型计算机的普及 …… (312)
5.6　联机系统和计算机联网的蓬勃发展 …… (316)
5.7　计算机服务业的兴起 …… (321)
第六章　新一代计算机 …… (324)
6.1　第五代计算机——人工智能计算机 …… (326)
1. 体系结构 …… (327)
2. PROLOG 语言 …… (331)
3. 计算机研究的冲击波 …… (332)
4. 对未来世界的影响 …… (333)
6.2　光计算机 …… (335)
1. 光计算机的特点 …… (335)
2. 光计算机技术 …… (336)
3. 光计算机的应用 …… (338)
6.3　生物计算机 …… (339)

第四篇 光电子学的发展

第一章 光电子学的出现…… (342)
1.1 光电子学出现前的研究 …… (342)
1.2 从电子学到光电子学 …… (346)
1. 光传送的历史 …… (346)
2. 从微波到毫米波 …… (347)
3. 光纤维 …… (348)
4. 激光器 …… (348)
5. 光应用技术 …… (350)
6. 长波长区的动向 …… (351)
第二章 激光器…… (352)
2.1 激光的发明 …… (352)
2.2 激光器的种类 …… (360)
1. 气体激光器 …… (361)
2. 固体激光器 …… (364)
3. 液体激光器 …… (367)
4. 自由电子激光器 …… (368)
5. 高温等离子体X射线激光器 …… (368)
2.3 半导体激光器 …… (369)
1. 半导体激光器的出现 …… (369)
2. 半导体异质结激光器时代 …… (371)
3. 半导体激光器的分类 …… (376)
第三章 半导体发光二极管…… (378)
3.1 历史的回顾 …… (378)
3.2 红外发光二极管 …… (380)
3.3 可见光发光二极管 …… (381)
第四章 其他光电子器件…… (388)

4.1　光电探测器 …… (388)
4.2　光电集成器件 …… (392)
4.3　非线性光电器件 …… (394)
第五章　光电子技术 …… (397)
5.1　光纤通信 …… (398)
5.2　激光存储技术 …… (403)
5.3　激光印刷技术 …… (405)
5.4　光电子显示技术 …… (407)
5.5　光互连 …… (411)

第五篇　21 世纪光电子技术综合发展的新时代

第一章　信息网络的发展趋势 …… (414)
1.1　综合化 …… (415)
1.2　宽带化 …… (416)
1.3　智能化 …… (416)
1.4　多媒体化 …… (417)
1.5　全球及个人化 …… (417)
第二章　支撑网络的计算和微电子技术的持续发展 …… (418)
2.1　计算机硬件 …… (418)
2.2　计算机软件 …… (419)
2.3　微电子技术 …… (419)
第三章　光子技术的崛起 …… (421)
3.1　光子学内涵 …… (421)
3.2　光子技术的特点 …… (424)
1. 响应速度快 …… (425)

2. 传输容量大 …… (425)
3. 存储密度高 …… (426)
4. 微型化和集成化 …… (426)
3.3 集成光子学的发展 …… (427)
1. 光子功能集成回路 …… (427)
2. 光子面阵集成 …… (429)
第四章 信息技术将给社会带来巨大的变化 …… (432)
4.1 光纤到户与电脑微型化 …… (433)
4.2 电子教育 …… (433)
4.3 电子通勤 …… (434)
4.4 信息市场与购物 …… (434)
参考文献 …… (436)

第一篇
无线电与电子技术

第一章　无线电的发明

1.1　无线电发明前的简易通信和电通信

1. 最简单的通信方式

人类的通信，经历了五个具有里程碑意义的发展：说话、写字、活字印刷、有线电信和无线电通信。尤其是无线电通信，它是在通信领域里的一个重大突破，同时也给人类带来了丰富多彩的生活和许多方面无可估量的价值。

由于生活、军事上各方面的需要，在传递信息上，人类在不断寻求扩大距离的通信方法。根据有文字可查的记载，在我国古代西周时期，就建有传报敌情的一系列烽火台，当边关出现敌情时，就点燃烽火，下一个烽火台看见了也接着点起烽火，这样，逐个烽火台传下去，一直将敌情的信息传到京城。18 世纪，在欧洲，英国的海军就建立了旗语通信。18 世纪末，法国一个名叫夏普(C. Chappe) 的人创制了一种横木通信机，用来传递信息，曾在欧洲广泛使用。夏普是法国的一名牧师，在神学院读书时就对信号机深感兴趣，他和兄弟合作，于 1791 年装配成了一台横木通信机。通信机的构造是这样的：在一根支柱的顶上，安放着一根横木，横

木两端又各有一根活动的木条，整个形态好像一个叉子。各支点装有滑轮，通过横木和两端木条的形状变化，组成各种图形，每一种图形代表一个字母。这样，就可以利用它来传递信息。

横木通信机在当时受到法国革命政府的重视，投资建造线路，1794 年 7 月建成了巴黎到里尔的通信线路。夏普的这种通信机在战争中大显神通，它使军事当局能及早地得到有关战争的信息，并曾屡屡拯救过己方的军事危机。因此，夏普被任命为共和国通信总工程师，两个弟弟同时担任助理，他们把通信线路不断扩建。当拿破仑称帝，向各处进军之际，夏普通信机也随着军事行动而广为应用。到了 1844 年，法国共有 533 个通信基地，5 000千米的通信线路，形成了欧洲最大的通信网。

除法国外，英国、瑞典、丹麦、德国和沙皇俄国都先后建造过夏普通信机线路。在通信网上使用了望远镜，另外还需要在每 10～13 千米处建立一个中继站，在从巴黎到里尔约 200 千米的线路上建有 10～12 个中继站，传输时间为 2 分钟。这种通信的缺点是使用人力很多，大约每个中继站需要 6 个人，故而费用很高。因此人类也在不断地寻求新的通信途径。

2. 有线电报

18 世纪末，人们已经对电流进行了各种应用，接着就出现了电报，初期的电报，无论是比较简单的电铃设备，或者是很复杂的设备，都要用几根导线接通几根针，用针组成不同图形来表示字母。因此，这些设备的应用都很受限制，主要用于铁路的信号传输上。在这方面真正有所突破的是美国的莫尔斯，他发明的电报机只需一根导线，电报机送给导线的是长短不同的瞬间电流，用它就可组成代表各个字母或数字的电码。

塞缪尔·莫尔斯(Samuel F. B. Morse)是一位牧师的儿子，和法拉第生于同一年，他学过一些化学和电学的知识，后到英国学

习 4 年绘画而成为一名画家，接着又在意大利逗留 3 年，于 1832 年 41 岁时返回美国。1832 年 10 月 2 日，“萨利”号正鼓满风帆破浪前进，莫尔斯和一位名叫杰克逊的医生在一起闲谈，谈到了电磁铁新器件的奇妙功能。杰克逊说：“最近许多实验表明，缠绕在线圈上的电线越多，电磁的吸引力也就愈强。实验还证明不论电线有多长，电流都可以瞬息通过。不久，科学将创造电的奇迹，接着将给人类生活带来巨大的变化。”仅这短短的一番话，就使得莫尔斯的一生发生了重大的转折。从那以后，绘画已不再是他的主要兴趣，充满他那写生本的也不再是人物像和风景画，而是他对电的研究中所用的各种草图、设计图样和学习科学的笔记。

莫尔斯夜以继日地工作，艰辛地但是一心一意地设计他的机器。由于他对电和机械的知识都很贫乏，因而困难重重，许许多多的问题使他一筹莫展。一次次试验，又一次次失败。3 年以后，他财力耗尽而仍然一无所获。1835 年，他不得不重操旧业，接受了纽约大学美术教授的职位。不过，他对发报机的工作始终没有放弃，他把收入的每一分钱几乎都花在了电报机的发明上。

莫尔斯在他的同事化学教授盖尔(Cale)和国立博物馆的亨利(Henry)的帮助下，继续孜孜不倦地反复试验，终于在 1837 年首次完成了电磁式电报机，并在大学内部做公开表演。在这次公开表演的参观者中，有一名盖尔的学生，名叫范尔 (Vail)，是一个铁工厂老板的儿子，他预见到电报机的重要意义，说服了父亲，为莫尔斯提供了资金和工厂设备，并在技术上帮助莫尔斯，莫尔斯的点、划电码就是在他的启示下改进而成的。此时，电报机才达到比较完善的地步。可是，以后莫尔斯竟把一切功劳归于自己，而使得协作者大为恼怒，最后诉诸于法院。

当莫尔斯研制成了电报机并试图说服人们投资时，却没有人感兴趣。可是莫尔斯并没有气馁，他带着电报机到了华盛顿，在

那里他说服了国会，提出了一项议案，即向他提供3万美元资金，以便在华盛顿和马里兰州巴尔的摩城之间架设一条40英里长的实验性电报线。但是，在一场辩论之后，国会没有通过这项提案。莫尔斯在事业上陷入了一生中的最大困境，快快地返回纽约，这时他口袋里只剩下不到一美元了。

第二年整整一年，莫尔斯靠卖画度日，挣扎在饥饿线上。但他终于碰上了好运气，从华盛顿传来了佳音，他请求基金的议案在国会重新提出，并且得到通过。莫尔斯喜出望外，感到电报事业有了光明的前途。他向学生借了钱，买了一套新衣服，兴冲冲地开始在华盛顿与巴尔的摩间架设电报线。不到两年，这项工程便完成了。

1844年5月24日，在华盛顿举行了一次隆重的试验仪式，莫尔斯邀请了一些客人到国会大厦最高法院会议厅，他的助手从40英里以外的巴尔的摩用点和划，即莫尔斯电码发来了简短的一句话："上帝创造了何等的奇迹！"这是伟大的一天，胜利的一天！当晚莫尔斯给他兄弟写了一封信，其中引用了圣经中的一段话："当一项发明创造了这般奇迹，而它又曾如此备受怀疑，历尽坎坷，可最终又从飘渺的梦幻变成了活生生的现实时，没有比这句虔诚的感叹语更为恰当的了。"并且说明了为什么要选用这句话。

莫尔斯想把它的发明以10万美元的价格卖给政府，但是，当时政府正在建设运河和铁路网，对于新的通信事业无力投资。莫尔斯只得自己去筹集资金，创办了磁电报公司，架设电报线，到1846年就使纽约——波士顿，费城——匹兹堡，多伦多——布法罗——纽约之间都有了电报线路。接着，由于需求增大，因而经营非常顺利，到1848年止，在密西西比河以东，已只剩佛罗里达一个州还没建立电报线路。事业的兴旺也引起了激烈的竞争，兴办电报的公司纷纷成立，其中最有名的便是莫尔斯在实业家施伯

雷指导和援助下，联合 65 家电报公司组成的“西方联合电报公司”（简称“西联”公司）。“西联”公司在 1864 年前，已建成了横贯美国大陆直达旧金山的电报线路。在 1861～1865 年的美国南北战争期间，通信对国家的重要意义进一步被人们所认识，通信给北军的胜利做出了重要的贡献。“西联”公司拥有的电报网与日俱增，1902 年，公司共有 160 万千米以上的电报线路和 2 条国际海底电缆，年收入达 2 900 万美元。

到莫尔斯 1872 年去世以前，莫尔斯电报机几乎已被欧洲所有国家采用，而且得到了不断的改进。从最初的纸带印字式电报机，改进为音响式电报机后，发报的速度提高到每分钟 30 字。1855 年，美国的音乐教师休斯（David Edward Hughs）发明了一种电传打字电报机，一分钟可打 250～300 个字；英国人惠特斯通（Sir Charles Wheatstone）1858 年研制成功钟表式结构的自动发报机，次年又完成了纸带莫尔斯电码打孔机，将发报速度提高到每分钟 500 字。

在陆地通信连成网之后，接着便提出了大陆与大陆，殖民地与宗主国之间的电报连通问题，这在当时来说是一个大难题。尽管惠特斯通早在 1840 年就有了敷设海底电缆的设想，但当时面临的困难有二：一是在海水水压下的绝缘问题；二是长距离敷设电缆不了解电气特性会有什么变化。德国人西门子（Wernervon Siemens）研制成了使用特种橡胶的绝缘电缆，英国印刷电报研究家勃莱特（Brett）兄弟制作了铠装电缆，1850 年第一次敷设了横贯英法海峡的海底电缆，然而第二天就断了，接着在 1851 年进行了第二次敷设，终于获得了成功。

这一成功，直接促进了工商业活动，给英国的大陆贸易带来了许多便利，因此又敷设了北海、地中海等海域的电缆，使英国和爱尔兰、德意志、荷兰之间，意大利和撒丁岛、科西嘉岛之间

都进行了电报通信。1853～1856 年间，在土耳其，英、法联军在对俄的克里米亚的战争中，地中海、黑海中的电缆都作为军用通信工具为战争服务，包围塞瓦斯托波尔的英、法联军，都通过电缆与本国进行联系，均发挥了最大的机动作用。

继欧洲各国之后，接着就提出了连结两大陆间的大西洋电缆，当时大西洋间已有了蒸汽机轮船的频繁来往，为此急切要求通信速度的提高。关于大西洋电缆计划，有人征求过法拉第的意见，他认为很长很长的电缆经过充电之后可能变为巨大无比的莱顿瓶，电报信号要因之衰减。

由于技术的问题，电缆敷设的困难很多。从 1857 年开始，接连遭到两次失败。1858 年 7 月进行了第四次敷设，在英国大物理学家凯尔文（Lord Kelvin）亲临指导下，解决了所遇到的一个又一个的难题，敷设工作终于获得成功。在开通典礼上，英国女王和美国总统互致祝贺，热烈庆祝这一具有历史意义的事业的成功。不料在三个星期之后，由于绝缘受损，三个月后线路中断，损失巨大。

但是，工业活动对通信有着强烈的要求，人们普遍认识到了海底电缆的重要性，因此在美国南北战争结束后，电缆敷设工作又重新开始。1865 年，使用了当时世界上最大的海轮——18 519 吨的格雷特·伊斯坦号进行敷设，尽管电缆被做了改进，但在敷设了 1 200 英里之后，又断裂入海，再次宣告失败。有的电报公司为此遭受了莫大损失而倒闭。一次又一次的失败，并没有使敷设电缆的人们的积极性挫伤殆尽，第六次的敷设又开始进行了，这一次凯尔文坐镇在格雷特·伊斯坦号上，敷设工作在 1866 年 7 月完成，而且把上次沉入海底的那条电缆也打捞上来并加以接通，这等于一次敷设成功了两条电缆。

此后，美国脱离了孤立状态，加强了与先进国家的联系，一

步步走向兴旺繁荣，这和电缆敷设成功不无关系，因而大西洋电缆的敷设被认为是19世纪一大事件而载入史册。与此同时，电缆的收益也增加很快，投资以最大的速度得到了补偿。凯尔文因技术指导有功而得到英国女王授予的爵位。随着各方面发展的要求和海底电缆事业的进展，1906年敷设了旧金山——上海之间的太平洋电缆。

3. 有线电话

随着电报信号的传输成功，电话的信号传送应该不是太困难的事，但是，它需要解决声波的机械振动转变为电振动，然后又由电振动还原为机械振动的问题，这在当时也不是一件很容易的工作。在这方面，由于亚历山大·格雷厄姆·贝尔（Alexander Graham Bell）的不懈努力，终于完成了这一不平凡的工作。

贝尔1847年3月3日生于苏格兰，和爱迪生同年，祖父和父亲都从事聋哑人的教育工作，贝尔深受他们的影响，决心沿着父辈走过的道路继续前进。中学毕业后，贝尔在爱丁堡大学学习了一年，便在学校谋到了一个职位。同时帮助父亲教聋哑儿童说话，他利用业余时间研究语音，研究人的发声和发音振动。

1871年贝尔在波士顿聋哑学校任教，一方面听公共课继续学习，一方面自学有关声学和电学的知识。1873年贝尔被任命为新的波士顿大学的发音生理学和讲演术教授，次年他申请并被批准为美国公民。

这期间，贝尔仍在做发声特点的实验，他研究了一种新方法，希望把声音转变为聋哑人能够“看见”的信号，这种研究虽然没有成功，但在实验过程中他发现了一种有趣的现象，这就是当他接通和断开电源时，发现螺旋形线圈里发出轻微的沙沙声。他还在进一步的实验中发现，可以通过线圈传送音乐和莫尔斯电码的“滴哒”声，不过线圈不能传输人的声音。这样的发现使贝尔得到

一种启示：能否用电流来传递声音呢？而且，贝尔也意识到：要传送人的语声，必须创造一种能随语声的音调而“振动”的连续电流，犹如说话时空气的振动一样。也就是说，必须以电波来代替说话时传送语声的空气波。这是一个具有创造性的重要设想，由这一设想奠定了电话发明的理论基础。他这一设想得到了当时的大物理学家约瑟夫·亨利的支持。同时他还得到了一位电学家托马斯·沃特森（Thomas Watson）的帮助，这对于缺少电学知识的他，这种帮助确实起到了非常重要的作用。贝尔和沃特森进行了和谐的合作，贝尔设计草图，沃特森进行连接安装，他们的工作非常艰辛，因为电话是新事物，没有什么实物可以参考，他们只有反复试验，从失败中积累经验，他们经历了一次又一次的失败，究竟有过多少次，究竟实验过多少方案，现在已经无法统计。两年过去了，最后，他们做成了两台今天看来是非常粗糙的样机。样机是这样的：在一个圆筒底部蒙上一张薄膜，薄膜中央垂直连接一根炭杆，将炭杆插在硫酸液里，当人对圆筒说话的时候，薄膜受到振动，因而在炭杆同硫酸接触的地方，其电阻也随着发生变化，这样通过的电流与振动有相应的强弱变化，这就是后来称之为所谓的液体受话器。在接收端，也利用类似的装置，将变化的电流信号复原成声音。他们就是利用这种样机继续进行着试验。

试验开始了，他们将导线从住房架到公寓楼的另一头，贝尔和沃特森各自对着自己的样机大声呼叫，可是，他们一连试了几天，嗓子都喊哑了，但他们听到的声音不是从墙壁传来的，就是从房顶上传来的，机器像聋哑人一样毫无反应，通话还是失败了。

他们并没有气馁，一直在思考失败的原因，是制作的技术问题，还是电流传递声音的根本想法有问题？对失败的总结加上坚持不懈的努力终于凝结为成功的希望。一天，沃特森和贝尔正在苦苦地思考，忽然听到窗外传来了吉他的声音，从叮叮冬冬的琴

声中，他们得到启发，很快意识到他们的送话器和受话器的灵敏度太低，所以声音异常微弱以致很难辨别。贝尔马上设计了一个共鸣箱的草图，两人连夜赶制，并对机器加以改装。

成功的一天终于到来了，这一天是1875年6月2日，傍晚，他们接着做实验，贝尔在实验室里，关严了门窗，沃特森在隔着几个房间的另一头，把受话器紧紧贴在耳边。贝尔一面调整机器，一面对着送话器呼叫。沃特森在另一头屏息静气地听着，听着听着，突然从受话器里传出清晰的贝尔的喊声："沃特森先生，快来呀！我需要你"，这就是历史上电话通话的第一句话。这一年，贝尔28岁，沃特森21岁。

他们继续努力，用了半年时间，对样机做了进一步的改进，做成了世界上第一台实用电话机。在1876年2月，贝尔申请了发明专利。

几个月以后，正好赶上费城举行美国建国一百周年纪念博览会。这是一次难得的机会，贝尔和沃特森赶到费城，在博览会上表演用电话通话。开始，他们的电话机被陈列在教育厅出口处的一个角落里，一连几天没有人理睬，评判员也不把电话机放在眼里。后来，巴西王太子彼得洛来参观博览会，他看见电话机以后，很感兴趣。贝尔随即向王太子做了介绍并当场进行了表演，其表演很成功，当王太子从耳机里听到了贝尔的说话声时，便惊奇地说："我的天，这钢铁的玩意儿竟会说话！"评判员这才开始重视起来。第二天，贝尔的电话机就被搬到了博览会最引人注目的地方，成了重点展览品，参观的人络绎不绝，并大加称赞。在这次博览会上，电话获得了一百周年纪念奖。

尽管如此，人们还是对于用电话进行远距离通话的可能性持怀疑态度，因此，贝尔当时曾经考虑将电话专利以10万美元的价格卖给电报垄断企业西联公司，但却遭到拒绝。

于是，贝尔他们一方面扩大宣传电话的实用性；另一方面对机器不断加以改进，扩大通话距离。1877 年电话的通信距离已增大到 43 千米左右，紧接着不久又扩展到 160 千米。1877 年 7 月 11 日，贝尔在他两个学生家长桑德斯和哈伯德的资助下组织了贝尔电话公司。就在这个时候，贝尔得到了第一批订货，一家防盗防火服务公司的老板霍姆斯定了几台电话机，将它们安装在顾客家里用来报警。从此以后，生意开始好起来。并且以波士顿为中心，各地都纷纷成立了电话公司，到 1879 年就达到了 148 个。在这段时间里，西联公司也看到了电话发展势头，匆忙采取对策，收买了另一家发明的电话机，进行改进，并求得发明家爱迪生的支援，爱迪生在贝尔发明电话之后，就觉得贝尔的液体送话器很不理想，便着手研究，他系统地试验了 2 000 种不同的物质，最后决定采用碳精按纽送话器，这种送话器的原理和现在所用的送话器已十分类似，其性能已大大超过贝尔原来的液体送话器。贝尔电话公司和他们展开了竞争，他们成立了电话实验室开展研究工作，并买下了德国人埃米尔·伯里纳（Emile Berliner）发明的话筒，使性能又超过了爱迪生的送话器。

两家公司明争暗斗各不相让，延续了一段时间，彼此都不堪困扰，终于在 1879 年相互妥协，并立下协议，西联公司尊重贝尔公司的优先权，自协议达成后便撤出电话事业；贝尔公司则买下西联经营的电话制造部门，以后受约不得插手经营电报。贝尔于 1881 年又获得了 1869 年建立的、以制造电报机起家的西方电气公司，将它作为贝尔公司系统下的电话机制造公司。

1885 年为建设长途线路而创立了美国电话电报公司，此后数年即出现了所谓的贝尔系统。总公司是美国电话电报公司，下面包括若干电话营业公司，西方电气公司是电话机生产公司，1925 年又正式建立了贝尔研究所（即贝尔电话实验室），专门负责进行

科研工作。

由于电话和电报在很多方面都不一样：电报从开始便多用于商业的往来和政府间的交换，服务内容不是个人对个人的直接通信，而且普通人也不熟悉电报机，不会熟练按键发报，也不会莫尔斯电码，只有经过专门训练的人员才能使用电报机直接通信，然而电话就方便多了，几乎几岁的小孩就能用它通信，也不受地点、时间的限制，随时拿起话筒就可以通话，而且可以听到对方的声音、声调和语气。不像电报通信非要到邮电局不可。因此，电话的发展很快，欧洲、美洲、亚洲、非洲……很快遍及全世界。据统计，目前全世界拥有的电话机已超过十亿部以上。

随着电话使用人数的增加，早在 1878 年就出现了电话交换局。1889 年斯特洛格（A. B. Strowger）研制成了自动交换机，于是有了不需等待的电话。电话交换机由最初的人工交换机发展到机电式自动交换机、电子交换机，直到现代的电脑控制系统。

1892 年，美国建成了纽约——芝加哥之间的电话通信。因为当时还没有电子管，更不用说晶体管了，所以人们克服了很多困难，这是一件不容易的事情。1906 年，美国 L. 德福雷斯特（Leede Forest）发明了真空三极管，不久之后用它制成了真空管放大器，声音可以得到放大，于是，长途电话的关键问题得到了解决。1915 年美国建成了横贯美洲大陆的纽约——旧金山之间的长途电话。

第一次世界大战后，由于电话的广泛扩展，电话需求数量剧烈增长，于是出现了载波电话，这是用不同的频率 f_0、f_1、f_2……的信号作为载波，将多路电话的音频信号逐个地调制在不同的载波上，在接收端再利用谐振电路和滤波电路将它们分别取出检波、滤波后送至各个通信用户。1918 年开始出现的是 4 路载波电话，到 1938 年发展到 16 路。后来又使用了双线、同轴线，到 20 世纪 80 年代初已实现了十几万路的载波通信电话。

1.2 著名的麦克斯韦方程组和麦克斯韦的预言

1. 天才数学家麦克斯韦

紧随着有线电话和电报的发展，在通信的另一个领域也开始了它的前进步伐，这就是无线电通信。无线电的发明及其以后发展到今天各个领域的丰硕成果，经历了一个复杂而艰辛的过程，其中经过许多科学家的艰苦奋斗，并且是在许多学科的理论和技术的成果和基础上积累和发展而取得的。

詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell）生于1831年，和电话发明家贝尔是同乡，都是苏格兰爱丁堡人。

麦克斯韦童年的欢乐是短暂的。他8岁那年，母亲患肺结核不幸去世，他的父亲从此挑起了抚养、教育他的重担。他10岁时被送进爱丁堡中学，这是个很有名望的学校，他在这里受到了良好的教育。但是在开始的时候，大多数的同学都欺负他，由于他是插班生，讲话带乡土音，穿着也和大家不一样，因此，在班上同学们常对他冷嘲热讽，有意孤立他，他在忍无可忍的时候也进行回击，但在大多数场合他保持沉默，只是不大愿意和大家来往，下课以后，他总爱独自坐在树下读歌谣、画一些只有他自己才看得懂的图画或者干脆一个人躲在教室的角落里，专心致志地演算一道道的数学题。同学们不理解他，不喜欢他，老师也认为他是个古怪的孩子，他在班上成了一只“丑小鸭”。

直到一次意想不到的事件的出现，才改变了这种情况。到了中年级的时候，在一次学校举行的数学和诗歌比赛上，当评选揭晓时，谁也没有预料到，竟爆出了大冷门，两个科目的一等奖都由同一个人获得，这个人不是别人，而是一向不被人看在眼里的麦克斯韦！这不但使全班同学惊奇得睁大了眼睛，连老师也感到意外，他们这才发现：这只灰色的“丑小鸭”原来是一只美丽的

“白天鹅”。

这次比赛改变了麦克斯韦在班里的地位，同学们再也不敢用冷眼看待他了，而是开始尊敬他，向他请教疑难问题，麦克斯韦成了受人尊重的优等生。麦克斯韦对数学、物理学有着浓厚的兴趣，尤其是喜欢数学。他的数学天赋，最早是他父亲无意中发现的。在麦克斯韦只有几岁的时候，有一天，父亲叫他画一个插满菊花的花瓶。麦克斯韦画完交卷的时候，父亲拿过他的画，边看边笑了起来，因为满纸上画的全是几何图形，花瓶是梯形，菊花成了大大小小的一簇圆和椭圆，叶片成了各种各样的三角形。从这以后，父亲开始教他几何学，后来又教他代数。于是，他和数学结下了不解之缘。

麦克斯韦的数学才华，使他很快突破了课本的界限，在他 14 岁时，就写了一篇数学论文，发表在《爱丁堡皇家学会学报》上。一个最高学术机构的学报刊登孩子的论文是罕见的，论文的内容是讨论二次曲线的几何作图，据说这个问题当时只有大数学家笛卡尔曾经研究过，而麦克斯韦的方法不仅与笛卡尔的方法不相同，而且更简便，当审定论文的教授确证了这一点的时候都感到非常吃惊。他这第一篇数学论文获得了皇家学会的优胜奖章。

1847 年秋天，16 岁的麦克斯韦中学毕业以后，考上了苏格兰最高学府爱丁堡大学，在那里专门攻读数学和物理学，他很快就引起了全班同学的注意，每次考试他都名列前茅，还时常给老师提出一些难以解答的问题。有一次他指出一位讲师讲的公式有错误，但老师不相信，并进行辩解说：“如果是你的对了，我就把它称做麦氏公式。”晚上老师回家经过仔细考虑和推算，发现是他自己讲错了。

到大学二年级的时候，麦克斯韦掌握的知识已经相当广泛。除了学习必修的功课外，他还开始自己搞研究，研究内容涉及光学、

电学和分子物理三个领域，这对锻炼他独立思考的能力起了很好的作用。不久，他在《爱丁堡皇家学会学报》上又发表了两篇论文，一位赏识他的物理学教授还特许他单独在实验室做实验。这一切都使他获得了登上科学舞台所必需的基本训练。但是，在三年级以后，对麦克斯韦来说，这个摇篮显得狭小了。为了进一步深造，1850 年他离开了爱丁堡，转到了人才辈出的剑桥大学学习。

在这个时期，麦克斯韦专攻数学，读了大量的专著，他的学习方法不像有些著名学者那样循序渐进、井井有条；他读书不大讲究系统性，但思维能力敏捷，联想广泛，有时为了钻研一个问题，他可以接连几周什么都不管；而另一个时候，他又可能碰到什么就读什么，漫无边际，像一个性急的新猎手，缺乏老猎人的指点，在数学领域里纵马任意驰骋。就在这个时候，一次偶然的机会，他遇上了剑桥大学教授、著名数学家霍普金斯。一天，霍普金斯在图书馆发现一个年轻人正在埋头读一本一般学生不能读懂的数学专著，并且不断地做笔记，笔记本上涂得乱七八糟，毫无秩序。霍普金斯不由得对这个青年发生了兴趣，诙谐地说："小伙子，如果像你这样没有秩序，你就永远成不了优秀的数学物理学家！"通过这次的认识，麦克斯韦成了霍普金斯的研究生。

霍普金斯学识渊博，治学严谨。对麦克斯韦的指导一丝不苟，对他的每一个选题，每一步运算都要求得很严格。麦克斯韦在他的影响下，很快就克服了杂乱无章的学习方法。在这期间，麦克斯韦认识了著名的数学家斯托克斯，斯托克斯在数学上造诣很深，有许多重要的发现和成就，在流体力学上也有重大贡献。经过这两位优秀数学家的指导，麦克斯韦进步很快，不到三年时间就掌握了当时所有先进的数学方法，成了有为的青年数学家。

当时数学家有两派，一派以古希腊的毕达哥拉斯为鼻祖，认为世界的本源就是抽象的数，数学决定一切；另一派以 17 世纪的

笛卡尔为代表，他认为数学是客观事物的定量反映，也是一种知识工具。这两种对立的态度，导致人们对数学持有两种不同的看法：一种把数学看做纯粹的符号，为数学而数学；另一种却把生动的物理学概念同数学结合起来，把数学当成研究物理学的手段。霍普金斯和斯托克斯都属于笛卡尔派。自然，麦克斯韦受到了他们这种观念的影响，重视数学的作用，一开始就把数学和物理学结合起来，这一点对他以后引进位移电流概念、建立麦克斯韦方程组、创立完整的电磁理论和取得其他科学成就都有着重要的影响。

1854 年，23 岁的麦克斯韦参加了数学学位考试，主考人是斯托克斯，题目内容涉及曲面积分和线积分，难度很大，事后大家才知道，那是斯托克斯刚发现的一个定理，就是数学上著名的斯托克斯定理。其全部内容为：

斯托克斯定理　矢量 $\boldsymbol{a}$ 在闭曲线 L 上的环流等于它通过任意曲面 S 的矢量旋度的矢流，但 S 位于矢量场中，而且以曲线 L 为边界：

$$\oint_L \boldsymbol{a} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \iint_S \nabla \times \boldsymbol{a} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

或

$$\oint_L a_\tau \mathrm{d}l = \iint_S (\nabla \times \boldsymbol{a})_n \mathrm{d}S$$

其中 a_τ 表示矢量 $\boldsymbol{a}$ 在曲线 L 的切线上的射影，$(\nabla \times \boldsymbol{a})_n$ 是矢量 $\boldsymbol{a}$ 的旋度在曲面 S 的法线上的射影。

这个数学定理对麦克斯韦后来研究电磁学和建立他的方程组起着决定性的作用。这次考试结果，麦克斯韦获得了甲等数学优等生第二名。也就是从这一年开始，这位青年数学家对电磁学产生了浓厚的兴趣。

2. 麦克斯韦与法拉第

麦克斯韦毕业以后留在学校工作。起初，他研究的课题是光学的色度理论，不久他读到了法拉第的《电学实验研究》，很快被书中新颖的实验和见解吸引住了。当时学术界对法拉第的学说看法不一致，有不少非议。其原因是“超距作用”的传统观念影响很深，而场的观念在当时还没有建立。同时也因为法拉第的学说在理论上还不够严谨，很多创见和内容都是用直观的形式表达的，缺乏一个严格、完整的数学形式描述。因此，一般的理论物理学家都不承认法拉第的学说，认为它不过是一些实验记录。有个天文学家就公开宣称：“谁要是在精确的超矩作用和模糊不清的力线观念之间有所迟疑，谁就是对牛顿的亵渎！”在剑桥大学，学者们也有分歧的意见，其中一位很有学识的青年教授威廉·汤姆逊（就是著名的开尔文勋爵），他极力支持法拉第的论点。在麦克斯韦毕业的前一年，他发表了一篇题目是《瞬变电流》的论文，指出莱顿瓶的放电有振荡性质，实际上这就是最早期的无线电中电磁波的发现。麦克斯韦对他的论文十分佩服，希望他在电学研究方法上能给自己以指导，汤姆生答应了他的请求，对麦克斯韦进行了帮助。

一年以后，24 岁的麦克斯韦发表了《论法拉第的力线》，这是他第一篇关于电磁学的论文。在论文中通过数学的描述，将电流周围存在的这一现象概括为一个矢量积分方程：

$$\oint_L \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \sum_i I_i$$

这就是最初的描述稳恒电流磁场的数学表达式。后来经过进一步完善，再加上其他三个方程

$$\oint_S \boldsymbol{D} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \sum_i q_i$$

$$\oint_L \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = 0$$

$$\oint_S \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0$$

就成为描述静止电荷的电场和稳恒电流的磁场的四条基本定律。它总结了自 1785 年法国库仑、1820 年丹麦奥斯特到英国实验物理学家法拉第在静电场和稳恒状态电磁场的全部工作。

1860 年初夏，28 岁的麦克斯韦到伦敦皇家学院任教，这是他一生事业的转折点。他到伦敦以后特地去拜访法拉第，这位伟大的实验物理学家已经年近七旬，他们在年龄上相差 40 岁，但是他们一见如故，亲切交谈起来。虽然两人在性格、爱好、特长等方面迥然不同，法拉第热情、和蔼，麦克斯韦严肃、机智；麦克斯韦不善于辞令，而法拉第演讲起来却是娓娓动听；在科学研究方法上，一个主要是实验探索，用直观而形象的方式表达真理，而另一个却擅长理论概括，用抽象的数学将事物客观规律总结出来；可是他们对物质世界的看法却产生了共鸣，两人相互尊敬，在许多方面相互补充，真是一种奇妙的结合。爱因斯坦曾经把他们称做一对，说他们就像伽利略和牛顿一样，相辅相成。

4 年以前，法拉第曾经称赞过《论法拉第的力线》这篇论文，但他没有想到论文的作者竟这样年轻。当麦克斯韦征求他对论文的看法的时候，法拉第说："我不认为自己的学说一定是真理，但是你是真正理解它的人。"

"先生能给我指出论文的缺点吗？"麦克斯韦谦虚地说。

"这是一篇出色的论文。"法拉第沉思地说，"但是，你不应该停留在用数学来解释我的观点，你应该突破它！"

法拉第的这一番话，给这位致力于物理学研究的青年数学家指明了前进的道路，这对于麦克斯韦以后所从事的科学研究起着

重要的作用。

3. 位移电流和麦克斯韦方程

麦克斯韦对电磁场力线进行了进一步的研究，他分析了法拉第对电介质的研究以后，发现了一个重大的问题：这就是在电场变化的电介质中也存在电流，这和原来的概念的电流产生磁场是完全矛盾的，按照以前的旧概念，包括法拉第的看法，人们讨论电流产生磁场的时候，是指传导电流，也就是

$$\oint_L \boldsymbol{H}^{(1)} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \sum_i I_i = \int_S \boldsymbol{j}_c \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

这里的 $\boldsymbol{j}_c$ 或 I_i 一直指的是传导电流，也就是在导体中自由电子运动所形成的电流，在上式中我们暂时将原来的 $\boldsymbol{H}$ 写为 $\boldsymbol{H}^{(1)}$，说明它只是磁场的第一部分。

在填充电介质的电容器连接交变电源时，电介质中并不存在自由电荷，也就是说不存在传导电流，只存在变化的电场，但却存在磁场，麦克斯韦经过反复思考和分析，确认这里的磁场是由另一类型的电流形成的，这种电流在任何电场变化着的电介质中都存在，他将它称之为位移电流 I_d

$$I_d = \int_S \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

$\boldsymbol{D}$ 为电位移通量，它和电场 $\boldsymbol{E}$ 的关系为

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E}$$

其中 ε_0 为电介质的介电常数。位移电流和传导电流一起构成了全电流

$$I = \sum_i I_i + I_d = \int_S \left(\boldsymbol{j}_c + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \right) \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

$\boldsymbol{j}_c + \dfrac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}$ 被称之为全电流密度。

从理论上引出位移电流的概念，实在是电磁学上继法拉第电

磁感应以后的一项重大突破。根据这个科学假设，再通过严密的数学推导，麦克斯韦得到两对高度抽象的积分形式或微分形式的方程组，这就是著名的麦克斯韦方程组（方程组直到1865年才最后完善）。

其积分形式为

$$\oint_S \boldsymbol{D} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \sum_i q_i \tag{1}$$

$$\oint_S \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0 \tag{2}$$

$$\oint_L \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = -\int_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{3}$$

$$\oint_L \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \mu_0 \int_S \left(\boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \right) \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{4}$$

其微分形式为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \tag{1}'$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \tag{2}'$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{3}'$$

$$\nabla \times \boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} \tag{4}'$$

式中 $\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度，$\boldsymbol{J}$ 为传导电流密度，μ_0、ε_0 分别为电介质的导磁系数和介电常数。

1862年，麦克斯韦将位移电流的概念及上述方程式的基本内容，写成他的第二篇电磁学论文《论物理学的力线》，发表在英国《哲学杂志》4卷23期上，文章一登出，马上引起了轰动。这的确是一篇划时代的论文，它同1855年的《论法拉第的力线》相比，是质的飞跃和重大突破，论文不再是对法拉第观点的单纯数学翻译和总结，而是在两个方面对法拉第的成果做了重大的发展：一是提出了位移电流概念，由位移电流说明不仅是传导电流产生磁

场，变化的电场也产生磁场；二是方程式（3）或（3）′都说明变化的磁场也产生电场。论文中指出：在没有传导电流存在的情况下，交变的电场也会产生交变的磁场，而交变的磁场又会产生交变的电场，那么，这种交变的电磁场就会以波的形式向空间传播开去。所以，麦克斯韦在这篇论文中已经预见到无线电波的存在。当时他才 31 岁，这是他一生中最辉煌的一年。

麦克斯韦没有停步，他继续向电磁学领域的深度进军。1865 年，他发表了第三篇电磁学论文《电磁场动力学》，论文发表在《伦敦皇家学会学报》上，在这篇重要文献中，他完善了麦克斯韦方程组的形式，并且运用了法国数学家拉格朗日和爱尔兰数学家、物理学家哈密顿创立的数学方法，由那组方程式直接推导出了电场和磁场的波动方程，方程的解是波动形式，这就严格地证明了电磁波的存在，而由此得到的波的传播速度正好等于光速 c，这同他在 4 年前计算过的数值完全相同。麦克斯韦由这个结论更进一步大胆断定，光也是一种电磁波。法拉第当年关于光的电磁理论的朦胧猜想，就这样被麦克斯韦变成了科学的理论。

麦克斯韦除了在电磁理论中的伟大成就外，对分子物理和天文学领域都有重大的贡献，如分子物理中著名的麦克斯韦速度分布律、天文学中关于土星光环由一群离散质点构成的论述等等，都是他成功地运用数学方法分析的成果。

1.3 电磁波确实存在

1. 真理却难露头

科学研究的道路并不是平坦的，尽管出现了麦克斯韦方程组，麦克斯韦由此进行了种种科学预言，确定了电磁波的存在，而且指出了它传播的速度等于光速。可是，在 19 世纪中叶，在整个欧洲，牛顿学说的习惯势力可谓根深蒂固，牛顿几乎成了偶像，谁

对超矩作用的怀疑就是对牛顿的亵渎，而按照牛顿的超矩作用理论，电磁波是不可能存在的。法拉第、麦克斯韦的电磁理论否定了传统的超矩作用学说，对物质世界做了崭新的描述，这在科学理论发展的道路上无疑是带有“叛逆”性质的。所以，当时人们包括许多科学家都不能接受，而且麦克斯韦方程组是高度抽象的，仅仅几个符号、几个方程式，却包罗了电荷、电流（包括位移电流）、电与磁等自然界一切电磁现象的客观规律，真正能弄懂它的科学家却寥寥无几，所以，在一般人看来，更是不可思议的。另外，还有一个更主要的原因，就是从麦克斯韦宣布他的理论以后，一直没有人发现电磁波。而能否证明有电磁波存在，却是检验麦克斯韦理论的关键，也就是麦克斯韦电磁理论能否成立的关键。因此当时许多物理学家都抱着怀疑态度，就连从前热情帮助过麦克斯韦、在电学上有着远见卓识的威廉·汤姆生教授，也不敢肯定麦克斯韦的预言是否可靠。因此，在相当长的一段时间里，电磁理论在德国和奥地利也丝毫没有立足之地，甚至被当作奇谈怪论，在英国更是如此。只有个别著名的物理学家相信它深奥的道理，认识到它具有重大的价值。最先认真考虑电磁理论的是波尔茨曼。他曾经试图把麦克斯韦方程组模型化、形象化，使人们容易理解，但是没有成功。在波尔茨曼以后支持电磁理论的，是在柏林大学任教的著名物理学家赫尔姆霍茨，后来突破了这一关键问题，发现了电磁波、证实了麦克斯韦电磁理论正确性的德国青年物理学家赫兹就是他的得意门生。

2. 赫兹实验

海因里希·鲁道夫·赫兹（Heinrich Rudolf Hertz）1857 年 2 月 22 日出生于德国汉堡，他从小勤奋好学，特别喜欢物理学。1878 年，因慕赫尔姆霍茨之名，由慕尼黑大学的工学院转到了柏林大学，不久后成了赫尔姆霍茨的得意门生，在老师的影响下，赫兹

对电磁理论进行了深入的研究，在这段时间里，他认真阅读并研究了前一个时期所有有关电磁理论的文章和实验报导，并将科学家们的看法、论点一一进行了比较，最后，他提出了自己的看法，他确认麦克斯韦的理论比各种超矩作用理论更有说服力。当时他在一篇论文里是这样写的："假使在通常的体系和麦克斯韦的体系之间只能选择一个，那么麦克斯韦体系无疑是占优势的。"于是他决心用实验来证实麦克斯韦理论的正确性，也就是要证明无线电波是确实存在的。

在1883年，一位爱尔兰教授菲茨杰拉德根据麦克斯韦的理论做过一个推论：如果那个理论正确，莱顿瓶振荡放电的时候，就会产生电磁波。他得出这个推测是由于曾经受到了威廉·汤姆生1853年那篇《瞬变电流》的启发。威廉·汤姆生当时在文章中指出：莱顿瓶和其他电容器的放电具有振荡的特性，电荷在衰减到零的过程中会呈现波浪式的上下起伏。因此菲茨杰拉德认为：放电的莱顿瓶就是最理想的电磁波辐射源。他并且指出：波长越短的电磁波，越容易被检测出来。

莱顿瓶是最早的电容器，由于1745年在荷兰莱顿城最先试用而得名，从富兰克林时代起就广泛使用。人们常用它做电的各种实验，它的构造简单，使用也很方便。所以问题的关键在于：用一个什么装置才能将电磁波检测出来。

赫兹经过多次反复试验，于1886年发明了一种电波环。这是一个十分简单却又非常有效的电磁波探测器，这是一根粗的铜线被弯成环形，环的两头分别连着金属小球，小球中间的距离可以调整，这就是电波环，看起来是多么简单的装置，但这却是当时检测电磁波的有效仪器。

赫兹用这种电波环进行了一系列实验，开始时他把电波环放在放电的莱顿瓶附近，反复改变电波环的尺寸和位置，当电波环

在适当的位置和尺寸时，电波环两个小球中间就有电火花闪现，这一现象太令人激动了。这正是莱顿瓶放电时候辐射出来的电磁波，为电波环的环路截获而激发出的电火花。被人们怀疑和期待已久的电磁波终于被发现了，无线电波的存在也终于被证实了，这一年是1888年。后来赫兹采用火花隙发生器代替了莱顿瓶，火花隙发生器是由两个粗细一致，长短一样的金属棒组成的，在两个棒的一端各有一个金属小球，用来发生火花放电。这样，所得到的实验结果更为显著。

随后，赫兹为了研究电磁波的性质是否与光波相似，他在1888年到1889年间又做了许多实验，其中的一个实验使用了一面锌镜，锌镜做成抛物面，在这次实验中赫兹是这样描述的："这面抛物面镜高为2米，口径宽为1.2米，厚为0.7米，主振荡器固定在焦距线正中，传导放电的导线穿过抛物镜，感应线圈及电池相应地放在抛物镜的后面。如果用电波环检查振荡器的周围就可发现：在抛物镜背面及两边都没有任何反应，而在抛物镜的光轴方向，甚至在5～6米以外的地方还可以看到火花"。这一试验的半波长约为30cm。从这一实验中证实了电磁波具有类似光的直进性，并且像光一样可以聚焦。另外，赫兹还将电磁波直接射到大型金属板上测量它的反射，还让它通过用硬沥青或者松脂制成的三棱镜测量它的折射性。赫兹还进行了衍射、偏振和干涉的试验。最后赫兹在总结各次实验的基础上做出结论，确认电磁波和光波一样具有直进、反射、折射、干涉、衍射和偏振等性质，肯定了光波和电磁波本质上是一样的。以后，赫兹又改进了实验，求出了电磁波的传播速度为每秒30万千米，从而完全证明了麦克斯韦的理论。于是，麦克斯韦天才的预言，在26年以后终于为同样是天才的实验家所证实。在当时它比海王星的发现更使人惊叹。

赫兹的实验公布以后，轰动了整个科学界。由法拉第开创、麦

克斯韦总结的电磁理论，到这时候才取得了决定性的胜利。这一年赫兹才 31 岁。赫兹的发现成了近代科学技术史的一座里程碑，具有划时代的意义，它不但证明了麦克斯韦发现的真理，更重要的是导致了无线电的诞生，开辟了电子技术的新纪元，奠定了今天近代无线电通信和崭新的无线电技术发展的物质基础，最后将使整个物质世界的面貌发生深远的变化。理论只能够解释世界，它只有回到实践中来才能够改造世界。赫兹的不朽功绩，就在于他在客观上促成了这个转变。

1.4 波波夫的雷电指示器

1. 为创立早期无线电接收机而努力的人们

赫兹的发现公布以后，吸引了许多科学家的注意，其中包括过去反对电磁理论的科学工作者，他们中很多人甚至转向了赫兹的实验，一些有远见的科学家意识到赫兹对电磁波的发现，不但在理论上有重大意义，而且在实用上也有很大的价值。于是，工程技术人员更是被赫兹波所迷住，绞尽脑汁地在考虑如何利用它。1888 年，德国一个不太出名的工程师胡布尔，提出了利用赫兹波来进行无线电通信的设想。胡布尔是赫兹的好朋友，他对自己的设想在技术上没有多大把握，就写信给赫兹，在信中提出了自己的设想并征求赫兹的意见。由于当时赫兹探测电磁波的目的，主要是为了证实麦克斯韦的理论，对电磁波的实用问题考虑得不多，因此他在给胡布尔的回信里答复说："如果要利用电磁波来进行无线电通信，大概得有一面像欧洲大陆那样大的巨型反射镜才行。"这封回信至今还保存在慕尼黑的博物馆里。这封信的回答，等于否定胡布尔利用无线电进行通信的设想。

在 1892 年，英国物理学家威廉·克鲁克斯（William Crooks）就曾做了如下的预言"在我们面前展开着一个崭新的奇

异世界，在这个世界中不能设想没有信息的传送和接收。这里最诱人的是没有电线、电缆、电杆木和昂贵设备的电报。”为实现无线电通信，他强调指出，需要可靠的发射机、灵敏可调的接收机和有方向性的天线。在这个领域工作的科学家和工程师们，后来一直在为这三个方面的工作进行着不懈的努力探索，从而取得了一个又一个的成果，当然，首先需要解决的是接收机的问题。

对于接收机，实际上早在1890年之前法国物理学家布兰利(Edouard Branly)就已经开始了对它的研究，他在重复进行赫兹实验的时候，无意中发现赫兹波使一个玻璃管内的铁屑的电阻减小了，这个“铁屑效应”的发现对他很有启发，于是，他就根据“铁屑效应”的原理来改进赫兹的接收器，赫兹检测电磁波的电波环过于简单，它实际上只相当于一个单匝线圈。电波环在感应到电磁波的时候，灵敏度是很低的。因此，赫兹的实验仅局限在实验室里。布兰利对赫兹的接收器加以改进，他把装有细铁屑的玻璃管两头，都接上导线和电池，在没有电磁波的情况下，玻璃管里的铁屑是松散的，不能导电；当电磁波辐射到接收器上的时候，玻璃管里的铁屑被磁化而粘在一起，就能够通过电流，比较好地起到了检测电波的作用，这就制成了金属屑检波器。在1890年，布兰利就是使用这种金属屑检波器，使电磁波的探测距离增大到140米。

1894年，英国皇家学会会员洛奇（Sir Oliver Joseph Lodge）对布兰利的发明做了改进。洛奇早年就对电磁波有所研究，他跟赫兹和开尔文都是朋友。他把金属屑检波器同继电器和打字机连接起来，组成了一台接收机。在实验过程中，金属屑受电磁波作用粘结以后，总是不能恢复原来的松散状态，为了解决这个问题，洛奇专门设计了一个机构，能够自动敲击玻璃管，使金属屑及时恢复原状。洛奇利用这些改良的装置，在相距几百米远的地方进

行了莫尔斯电码的无线电传送。洛奇的检波器在早期的无线电研究中发挥了巨大的作用。

洛奇在英格兰进行实验的同时，远在太平洋的新西兰岛上，坎特伯雷学院一个4年级的大学生卢瑟福，也在改进布兰利的检波器。卢瑟福当时只有23岁，正在准备理科学士的学位考试。坎特伯雷学院尽管设备简陋，但是要求很严格，学生要通过学位考试，一定得写出有独创见解的论文才行。卢瑟福选的题目是《赫兹波的研究》。在实验中，他对布兰利的检波器不大满意，就动手做了改进。他躲在破旧、阴冷的地下室里，发明了别具一格的磁性检波器，这是一个里面放着一束磁化过的细钢针的线圈，当电磁波到达线圈的时候，线圈的感应作用可以使钢针暂时失去磁性，这样就达到了检测的目的。卢瑟福的磁性检波器比起布兰利的金属屑检波器来，检波灵敏度要高得多。1894年的《新西兰协会学报》发表了卢瑟福的研究论文《用高频放电法使铁磁化》，这篇论文引起国内外科学界的注意，卢瑟福因此获得了理科学士学位。在这一年，卢瑟福还在一座18米长的工棚里进行了电磁波收发表演，有人把这次表演中收发的信号，称做“越过新西兰上空的第一份无线电报”。当时很多人都认为他最有希望发明无线电。但是，1895年他获得了到英国去深造的奖学金。他到剑桥大学以后，受到原子物理学家约瑟夫·汤姆逊的影响，就改变了研究方向，后来成了杰出的原子核物理学家，而在无线电领域却失去了一位非常有前景的贡献者。

在美洲大陆，纽约的中年电学家台思拉对无线电传送信息有着浓厚的兴趣，早在1890年，他就取得了用来产生高频振荡的台思拉线圈专利。在1893年，他发表了电磁波接收的调谐原理，并且做了许多关于遥控方面的试验，如：用无线电波启动了远处的电灯开关，用无线电波驾驶快艇模型等。这些实验都预示了无线

电广播和传真的可能性。

由于前面许许多多无线电科学家和技术工作者在这方面所做出的种种工作，才导致了后来的波波夫和马可尼无线电发明的公开发表和推向实际应用。

2. 波波夫的接收机和第一根天线

阿历克山大·斯切潘诺维奇·波波夫(Александр Степанович Попов) 1859 年出生在俄国乌拉尔一个矿区的小镇上，少年时候就对电工技术和机器非常爱好，中学时期，他对物理学和数学最感兴趣。1877 年，18 岁的波波夫考进了彼得堡大学数学物理系，在大学期间，他非常勤奋、刻苦，电学成了他最喜爱的学科。他总是不满足于课本知识，常常提出一些新奇的创见，有些教授们对这个不“安分守己”的学生并不赏识，因而波波夫意识到彼得堡大学不能发挥自己的才能，就转学到森林学院学习。波波夫在这里，有一段时间热心研究使用炸药，试验利用炸药在森林里开路，这是很危险的工作。后来他研究出用无线电遥控炸药的爆炸，获得了成功。



图 1.1-1　波波夫像

1882 年，23 岁的波波夫大学毕业，他被喀琅施塔得海军水雷学校请去当教员，这里有很多的电学仪器，学校的实验室在当时的俄国是一流的。他充分利用学校的良好条件，进行了许多有关电磁方面的试验，积累了丰富的电磁实验的知识。当时他的志愿

是："要走遍俄罗斯，为整个俄国带来光明。"

1888 年，波波夫 29 岁，赫兹发现电磁波的消息传到俄国，他被强烈地吸引住了。他兴奋地说："用我一生的精力去装设电灯，对广阔的俄罗斯来说，只不过照亮了很小的一角；要是我能够指挥电磁波，就可以飞越整个世界！"从此以后，波波夫的理想改变了。

第二年，波波夫重复了赫兹的实验，实验很成功。因而在一次公开的讲演中，他在胡布尔以后重新提出了可以用电磁波进行无线电通信的设想。波波夫怀着新的理想，在实验室里埋头研究，制作了很多有关的仪器。他仔细、认真地研究了布兰利、洛奇等前人所做的这方面工作。

1894 年，35 岁的波波夫研制成功了一台无线电接收机。这台接收机的核心部分，用的也是改进了的金属屑检波器，跟洛奇的检波器具有同样的效果，而且波波夫为了使用方便，将打字机改用电铃作终端显示，电铃的小锤可以把检波器里的金属屑震松，电铃用一个电磁继电器带动，当金属屑检波器检测到电磁波的时候，继电器接通电源，电铃就响起来。这台接收机同洛奇的那台结构相似，但是灵敏度却高得多。这就是波波夫集中以往科学家们的成果加以改进后所制成的一台比较好的无线电接收机。

另外，波波夫在这上面有一个独特的贡献，这就是他首次在接收机上使用了天线，这件事也是在一次实验中偶然发现的。有一次，波波夫在进行实验，发现接收机检测电波的距离比平常有明显的增加，他很久都找不出原因，感到很奇怪。后来，他突然看见一根导线碰到了金属屑检波器，波波夫把导线拿开，电铃就不响了，可是把实验距离缩小到平常那样近，电铃又响起来。这个意外的发现，使波波夫得到了一个重要启发，他索性把导线接到金属屑检波器的一头上，并且把检波器的另一头接地，结果实

验距离大大增加。这根导线就是世界上的第一根天线。波波夫的这一发现意义很重大，成为以后天线理论和技术发展的一个开端。它同布兰利发明金属屑检波器的价值不相上下。

波波夫首先把他的接收机用在检测雷电方面，他把这台机器称做“雷电记录仪”。也就是说，波波夫当时的实验只局限在气象观测上，还没有发展到无线电通信领域。

1895 年 5 月 7 日，波波夫在彼得堡俄国物理化学会的物理分会上宣读了《金属屑同电振荡的关系》的论文，并且表演了他发明的无线电接收机。

表演是在大厅里举行的，波波夫沉着地在大厅的讲台上安放好接收机，他的助手雷布金在大厅的另一头操作火花式电磁波发生器。波波夫的接收机由金属屑检波器、电铃、继电器、记录器和一根垂直的天线组成。当雷布金接通火花式发生器的时候，接收机的电铃立刻就响起来，断开了发生器，铃声也就随着停止。当时，出席会议的都是物理学界的知名人士，其中有的人思想保守，根本不相信电磁波能够传递信号，而这次却耳闻目见，不得不信服，其中一个原来持反对态度的科学家，这次还上台去同波波夫握手，表示祝贺。表演结束，波波夫充满信心地说：“最后，我敢于表示这样一个希望，我的仪器在进一步改良以后，就能够借助于迅速的电振荡进行长距离通信。”后来，原苏联政府把这一天规定为“无线电发明日”。

1896 年 1 月，俄国物理化学协会刊物《电》一月号发表了波波夫的文章，介绍了这次表演的情况，它立刻引起了全球学术界的关注。

接着不久，波波夫用电报机代替电铃，当作接收机的终端，他的装置就成了一台无线电收报机。1896 年 3 月 24 日，波波夫和助手雷布金在俄国物理化学协会的年会上，正式进行了用无线电传

递莫尔斯电码的表演，在场的观众有 1 000 多人。表演的时候，接收机装设在物理学会会议大厅里，发射机放在附近森林学院的化学馆里，雷布金拍发信号，波波夫接收信号，通信距离是 250 米。物理学会分会会长佩特罗司赫夫斯基教授把接收到的电报字母逐一写在黑板上，最后得到的报文是："海因里希·赫兹"。它表示波波夫对这位电磁波的伟大发现者的崇敬。这份电报虽然很短，却是世界上第一份有明确内容的无线电报。

波波夫的成功，预示了人类通信史上的一个新纪元就要到来了。

1.5 马可尼的早期收发报机

马可尼（Gaglielmo Marconi）1874 年出生于意大利北部的波伦亚城，父亲是个农庄主，母亲是爱尔兰一个贵族的后代。马可尼自幼天资聪颖，勤奋好学，少年时特别喜欢阅读物理学方面的书籍。赫兹发现电磁波的时候，马可尼才 14 岁。

马可尼 16 岁那年，有个叫李奇的老师送他一本电学杂志，马可尼按照老师的要求，仔细阅读了杂志上那几篇介绍赫兹实验的通俗而有趣的文章，受到了很大启示并对此感到极大兴趣。李奇也是研究电磁波的，对赫兹实验的原理和意义理解得很透彻，在李奇的指导下，马可尼在学校做了一些电学实验。后来他在家里也做起了他的实验。

第二年，马可尼 17 岁，他一面做实验，一面收集大量的资料，从布兰利、洛奇、台思拉这些大师的研究成果直到一些不著名的人的文章，他都千方百计地找来了。马可尼钻研了整整一年，把这些先进者的见解和得失弄清楚以后，他决定把各家的长处综合起来，用在设计和制作自己的装置上。

他经历了很多次的失败，他父亲常常嘲笑他是个"不切实际

的空想家”，但他毫不气馁，继续进行他的实验。终于在 1894 年，当他 20 岁的时候，迎来了他的初步胜利。这一天，他在他家里的实验室里做他的实验，他的实验台是一张小长桌，上边摆着一台简陋的收发报装置（如图 1.1-2），当他一按电钮，就从楼下客厅里传来一阵铃声，而楼上和楼下是没有导线相连的。这就是马可尼的第一次无线电传送的信号。



图 1.1-2　马可尼和他的电报装置

1895 年夏天，21 岁的马可尼在父亲的花园里进行了一次非常成功的电磁波传递信号实验。他用的发射装置，是李奇改进的火花式发射机，接收机带着一根天线，同波波夫的很相像，其中金属屑检波器是洛奇改进的那一种，另外还有电铃和电池。这一年的秋天，马可尼把电磁波的传递距离扩大到 2.7 千米。他把火花式发射机放在村边的小山顶，天线高挂在一棵大树上，接收机却安放在家里的三楼，他安排他的助手在小山顶上发报，他在楼上接收。对方发送信号的时候，接收机的电铃能够清晰地发出响声。

实验取得了巨大成功。

这就是马可尼最早使用的无线电收发报机，它是两个相当笨重的箱子。马可尼渴望对机器做进一步改进，也迫切希望它在应用上得到推广和发展，但首先需要经费，他先向意大利邮电部申请资助，但没有得到支持，接着他转向英国。在英国，马可尼很幸运，他很快就得到政府部门的赏识和支持，从而也使无线电得到了迅速的发展。

第二章 无线电通信和无线电广播

在无线电通信和广播的发展过程中，主要遇到的是两方面问题，一方面是客观形势需要和经济条件问题：这里包括商业形势，军事、海上航行的安全等的迫切需要，经济条件指政府部门的关注和投资等；另一方面是技术问题：要想实现远距离的稳定通信，必须拥有大功率的发送设备、灵敏度高的接收机和适用于不同情况的各种天线，还需要对电波传播理论的若干问题加以解决。上述几种技术条件，在研究中各自都碰到过不少困难，通过科学家们的不懈努力，才得到了解决。如发送设备中就有：大功率管、高频放大、调幅、调频、单边带发射、稳频、多路、降低噪音直到目前的现代通信技术等一系列问题。在本章中主要介绍发射设备和接收的发展过程，至于电波传播和天线的发展，将在以后章节中加以介绍。

2.1 早期的无线电通信

1. 两种不同遭遇

电子管的发明者弗莱明（J. A. Fleming）曾经给了马可尼一个评价，“马可尼是杰出的实利主义者。他最关心的不是纯科学知

识本身，而是期望为有益的目的做实际应用。”所以马可尼在试验成功以后，便马上给意大利邮电部部长写信，要求政府资助，以便将无线电迅速投入使用，而意大利政府对这个不知名的小人物的研究和建议根本不感兴趣，很礼貌地回绝了他。马可尼受此打击，不免有些灰心丧气，但他的母亲却一直支持和鼓励他，他的母亲安妮（Annie）很有见识且活跃于当时英国的最高社交界，她鼓励马可尼到英国去发展他的事业。于是，1896 年，22 岁的青年马可尼带着他的发明出访英国，不久，在 1896 年 6 月 2 日他的发明就取得了英国政府专利。专利局的官员还给了他一张名片，介绍他去找英国邮电总局的总工程师普利斯博士。

普利斯是英国电信界权威人士，从 1882 年起，他就在研究无线电报，他用的是电流感应的方法，虽然经过十多年的研究，但在长距离通信上，结果仍然是失败的。当他知道马可尼的电磁振荡的方法在无线电通信上获得了成功时深感兴趣，当他见到了马可尼并进行了深入交谈之后，他很赏识马可尼的才干，请他留在邮电总局做进一步的实验。

第一次，马可尼在邮电总局大楼顶上和 300 米远的一座银行大楼之间进行试验，结果是成功的。接着不久之后，在普利斯的帮助下，马可尼在索尔兹伯里平原进行了无线电实地收发实验，距离达 8 千米，也获得了成功。

这时，普利斯决定将马可尼和他的无线电报介绍给英国公众，让全英格兰都知道它。为此，在 1896 年 12 月 12 日，在伦敦科技大厅、普利斯举行了一次关于新的电报介绍会议，会上他做了关于无线电报的科普讲演，接着让马可尼进行无线电报通信的表演。

马可尼的收发报机是两个大盒子，一个盒子装着发射机，就是火花式发射机，它由电池、线圈和一对形状跟哑铃相像的赫兹振子所组成，另外一个盒子就是接收机，其核心是一个带继电器

的金属屑检波器，接有两条水平铜带，作为接收天线，另外还接一个电铃。

发射机和接收机分别放在大厅的两个角上，一个自告奋勇的听众当发报员，马可尼守着接收机。当发报人按下电键的时候，马可尼的接收机上的电铃立刻响了起来，为了证明没有弄虚作假，马可尼举起盒子，在会场里到处走动。每个与会者都听到了铃声，整个大厅顿时沸腾起来。普利斯趁此机会将年轻的发明家介绍给公众，使他登上了英国的社会舞台。不久之后，全英格兰都知道了马可尼和无线电报。普利斯不仅大力帮助和支持马可尼，为他做广泛宣传，而且还积极设法为他争取政府的资助。这一切，对马可尼的事业产生了重大的影响。

当然，马可尼的无线电报得到英国政府重视还有它的重要社会原因。当时，英国正处在资本主义向帝国主义发展时期，海外贸易很发达，同海外的密切联系非常必要，因此，无线电通信如果能够成功应用，就会对英国的航海事业以及海外事业带来重大的利益。另一方面，英国有优良的科学传统，政府比较重视科学发明，所以政府有关方面愿意支持马可尼，也乐意资助他。

可是，波波夫的遭遇却恰恰相反。

由于沙皇俄国封建落后，漠视无线电事业和科学家，波波夫的发明没有得到政府的关心和帮助。波波夫第一次向有关当局申请实验经费时，竟得到这样的批示："对于这种幻想，不准拨款。"只是由于海军上将马卡洛夫一再坚持，后来才拨下区区 300 卢布。

在这时候，马可尼却高兴地得到了普利斯的通知：英国邮电总局同意给他提供全部实验经费和所需要的各种物资，用来进行海上通信试验。

1897 年初，马可尼在英国西海岸南段的布里斯托尔海湾开始了跨海通信试验。马可尼的发明究竟有没有生命力，将由这次试

验的结果来决定。所以，普利斯对这次试验抱着很大希望，特地叫自己最信任的助手乔治·肯普来帮助马可尼。

马可尼把发射机装在拉渥洛克岸上的小屋里，屋外竖起的一根很高的杆子，上面架设了用金属圆筒制成的天线。接收机开始放在海湾里的佛勒霍姆小岛上。接收天线也是架在高杆上的金属圆筒，跟对岸的发射天线遥遥相对，收发两地之间相距 4.8 千米，通信效果非常好，跨海通信试验初次获得成功。

经过一段时间试验之后，马可尼和肯普把接收机移到海湾对岸的布瑞当，收发距离增大到 14.5 千米，这次是用两只覆盖着锡箔的风筝作收发天线，在实验中，风筝可以升到 49 米高，比先前的圆筒天线高得多。在 5 月 18 日这一天，通信实验获得很大成功。无线电信号第一次传过了布里斯托尔海湾，普利斯对试验结果非常满意。

马可尼在英国进行无线电跨海试验的成功，引起了意大利政府的重视。同年 6 月马可尼接到意大利驻英使馆的通知回国。他在意大利建立了一座陆上电台，跟意大利军舰通信，通信距离延长到 19.2 千米。意大利国王和王后在罗马接见了他，并且很有兴趣地观看了他的表演。

1898 年 7 月，马可尼的无线电报装置正式投入商业使用，替爱尔兰首都都柏林《每日快报》报导快艇的比赛实况。马可尼把电台装在一条租来的轮船上，随时把比赛进程拍发给岸上的接收台，然后通过电话线直接告诉《每日快报》编辑部，当天晚上晚报就登出了快艇的比赛结果。

接着，无线电报在营救海难上首次创建功绩。这是 1899 年 3 月，一艘邮船在海上和一艘灯船（相当于浮动灯塔）相撞，由于灯船上装有无线电报装置，并且和马可尼在南海岬灯塔上的无线电报建立了无线电通信，因而及时发出了出事的消息，南海岬立

刻派救生艇赶到出事地点，使遇难船员全部获救。

1899 年 7 月，马可尼的无线电通信装置第一次在英国海军演习中使用，在英国皇家海军舰艇“亚历山大”号、“欧洲”号和“女神”号上都安装了马可尼的电报装置。演习中，马可尼、肯普和另一名助手分别在这三艘军舰上工作，在演习中，通信装置使用得很成功。而且当两艘军舰行驶到互相看不见的地方时，通信照样可以进行。这意味着电磁波信号可能具有“绕过”地球本身的曲面进行传播的性能。在这次演习结束后，英国皇家海军同马可尼签订合同，要他第二年给英国海军的 28 艘军舰和 4 个陆上通信站安装无线电通信装置。这是马可尼公司签定的第一个合同。

马可尼没有满足于已经取得的成绩，继续进行试验。也就在这一年的夏天，他成功地实现了英、法海峡——多佛尔海峡两岸的无线电报联络，把通信距离增大到 45 千米。英、法各报都在头版做了报导，学术界也发表文章赞扬和评论这次试验。

在增大通信距离的过程中，马可尼同样做了很多艰苦的工作。一系列的试验表明，天线越高，通信距离就越大。但是，无论在岸上还是在舰船上，天线的增高都是有限度的。后来，马可尼就把注意力集中在增大发射功率和接收机灵敏度上，因为当时使用的发射机还停留在火花式发射机设备上，而接收机也还停留在洛奇的金属屑检波器水平上，只是马可尼对它做过改进，将检波器的玻璃管排了气，精选了封入用的金属，并掺入了少量银粉和镍粉，但当时电子管还没有问世，所以大功率的发射设备和高灵敏的接收机仍然不能实现。

1899 年 9 月和 10 月，马可尼应邀到美国访问，他用随船携带的无线电装置报导了在美国领海里举行的国际快艇比赛。在访问结束的回国途中，当抵达英国水域的时候，他和英国怀特岛上的尼特无线电站进行了通信联系，这一次通信的距离突破了 106 千

米，这一天是 1899 年 11 月 15 日。

也正是这个时候——1899 年 11 月，波波夫的工作，才得到俄国海军部的承认。当时，俄国战斗舰“阿普拉克辛海军上将”号在哥格兰德岛附近触礁，为了进行营救，波波夫在科特卡城和哥格兰德岛之间建立了俄国第一条实用的无线电报线路，距离 40 千米，完成了营救任务。3 个月以后，通过这条无线电通信线路，又救出了 27 个遇难的渔民。在喀琅施塔得港担任司令的马卡洛夫收到波波夫的报告，给他发来了热情的贺电，马卡洛夫是俄国第一个理解波波夫事业的人。

在营救了战斗舰“阿普拉克辛海军上将”号中成功地应用无线电报以后，海军总部终于相信了波波夫的发明，让他在俄国军舰上训练使用无线电报的人员。但是宝贵的时间已经过去了，马可尼已经远远超过了波波夫。

2. 横跨大西洋的无线电发送设备

马可尼在无线电通信突破 100 千米的记录以后，并没有因此而感到满足，他将目光投向了辽阔的大西洋，渴望建立欧洲和美洲之间的无线电通信。

为了实现越过大西洋进行通信的宏伟计划，马可尼认识到他必须去做大量的准备工作。他根据 1899 年在大西洋上进行通信试验得到的经验认为，电磁波有可能“绕过”地球曲面传到大西洋彼岸，为此，他首先要在实践中去进行探索。1900 年他试制成无线电史上有名的调谐电路并取得了该项专利，这种电路相当于现代接收机的输入调谐回路，虽然不复杂，却使那种简易接收机的灵敏度和选择性有了显著的提高。

同年 10 月，马可尼在普尔杜建立第一座大功率发射台，采用的是 10 千瓦音响火花式电报发射机，这是当时世界上功率最大的发射机。同发射机相配合的天线也设计得很复杂，最初架设的是

一种庞大的垂直天线阵，是用 2 000 根 60 米高的金属杆围成的一个大圆柱网，网的直径是 45 米，周围还有很多固定的缆绳，可是因为天线太高，支撑困难，没有多久就被大风刮倒了，随后，马可尼又改变设计方案，新架设的天线是用很多根垂直天线排成扇形，结构牢固，抗风性强，高度也从原来的 60 米降低至 51 米，经过试验，天线的强度和性能都很好，初次通信试验，通信距离就达到了 322 千米。

1901 年 12 月 6 日，马可尼由英国来到了加拿大纽芬兰的圣约翰斯港，他们为了要选择一个建立接收站的合适地点而走遍了圣约翰斯的海岸，最后他们选中了一座小山，它后来被人们称为信号山，这是一块可以俯瞰整个港口的高地，四面有天然屏障阻挡大西洋的飓风，山顶上有两英亩左右的平地，正好可以架设气球或者风筝天线，这儿就成了马可尼的接收站。

12 月 9 日，他们在信号山开始工作，两天以后架设天线，马可尼决定用气球把接收天线升起来，天线很长、很重，他们用了一个直径近 5 米的氢气球，当气球升到约 30 米高的时候，气球很快被大风卷走了，第一次就这么失败了。第二天，也就是 1901 年 12 月 12 日，马可尼改用风筝将天线送到 130 米的高度，而且决定不用莫尔斯电码记录仪作接收机终端，改用电话机来直接收听金属屑检波器的输出信号，因为他根据以往的实验认为人的听觉比记录仪器灵敏得多。这次实验在发射机端采用了 20 千瓦的大功率发射机，使用频率为 300 千赫（即波长为 1 000 米），大约在中午 12 点半，马可尼和两个助手在电话接收机中，从严重的静电干扰声中，听到了哒哒哒三声微弱的音响，这是事先约定的莫尔斯电码“S”的信号。这一天，信号跨过了大西洋，飞越了 2 700 千米，标志了远距离无线电通信的诞生。

当然，马可尼的成功绝非在欧洲各方面都受到了友好欢迎。相

反地，他遇到了电报和海底电缆公司的强烈反对，因为无线电通信的发明对他们的利润收入是一种威胁。英国邮政总局也反对把马可尼的无线电和它的电报联系起来。但是，英国的海军和洛依德海上保险公司却给了马可尼公司积极支持。英国海军大将亨利·杰克逊早就在秘密进行无线电通信的研究。后来在为争夺德兰士瓦金矿的南非战争中，立刻证明了无线电通信在军事行动上的好处。为了争夺殖民地，称霸海上的英国海军，曾有三分之二的舰只都装备了马可尼公司的无线电通信设备，在英国海岸也建立了许多的无线电台。

自此以后，各国的海军和商船都以英国为例，纷纷安装无线电通信设备。但由于马可尼采用了完全排他性的经营方针，无线电设备只租不卖，报务员要由公司训练委派，并禁止和其他公司的无线电设备通报，这就受到了美国和德国的坚决反对，德国通过德律风根公司和马可尼公司展开竞争。为了解决这种混乱的、割据的竞争局面，在1908年，各国订立了一切船只无线电台可和世界任何海岸无线电台通报的协定。

无线电通信在海上的发展由于出现了下述两起重大海难而引起了世界各国的高度重视。

1909年1月23日凌晨5时30分，15 000吨位的“共和号”陷入了浓雾之中，在离美国东海岸安布罗斯灯标约280千米处，与向西驶往美洲的意大利轮船“佛罗里达”号相撞，该船上有800名移民。“共和号”船上的无线电军官杰克·宾斯向美国彼岸的赛厄斯康塞特发出了无线遇险信号CQD，第一个到达出事地点的是“波罗的克”号，该船是在求救信号发出30分钟之后得知这一消息的，并借助“共和号”发出的无线电信号为它在浓雾中导航，两艘船上的1 700条性命得救了。这一事件使全世界的人们了解到，没有无线电通信，就不能避免这场大悲剧。

这个撞船事件发生以后，英国白星轮船公司建造了一艘更大的邮船“泰坦尼克”号，这是当时世界上最大的一艘邮船，排水量 4.6 万吨，总长 267 米，双层船底，船上装备了最新式的机器，还有豪华的设备，号称“水上之城”。1912 年 4 月 10 日“泰坦尼克”号在英国南安普敦港下水，开始了横渡大西洋的首次航行。这艘豪华的大邮船载着 1 348 位旅客和 864 位船员，总共 2 212 人，它的航程终点是纽约。当它航行到大西洋北部纽芬兰岛东南方时撞到了冰山上，船被严重撞坏，裂口将近百米长，5 个密封仓都进了水，船注定是要沉没了。当“泰坦尼克”号撞上冰山后 10 分钟，船长立刻命令无线电报务员发出了国际会议决定的 SOS 求救信号，信号发出两小时后船即沉没。当时离它最近的两条船，一条没有电台，一条是报务员在睡觉，结果远离 90 千米的“卡尔帕夏”号收到呼救信号后，经过好几个小时才驶到出事地点，只救出了 705 人，另外的 1 500 多人全部遇难。这一巨大悲剧引起了全世界的震动。整个事件表明，无线电在航海事业中有着不可估量的作用。为了防止此类悲剧的重演，1913 年在伦敦召开了海上生命安全国际会议，会议规定 5 000 吨以上的轮船必须安装无线电收发报机，24 小时都必须有人值班。因此，无线电事业得到了进一步的发展，马可尼公司生意更加兴隆，全世界的无线电电信事业也在蓬勃发展。

2.2 无线电发送设备的发展过程

在这段时间中，无线电通信只限于无线电报，技术上还比较简陋，采用火花式发射机作为无线电台，这适用于长波。第一次世界大战（1914～1918 年）前后，采用了电弧式、发电机式无线电台，在功率、效率、频宽和频率稳定方面都得到了改进和提高。自从电子管发明后，特别是在 1914 年美国人兰米尔

(I. Langmuir) 研制成了高真空电子管后，便进入了电子管式无线电台时代，在这一时期，无线电话和无线电广播也随之大大发展起来。1918 年电子管技术显著进步，发射、接收都可以使用电子管。1923 年电子管制作技术又取得了巨大进展，随之电子管无线电台更进一步发达起来，火花式时代至此彻底结束。20 世纪 60 年代进入了晶体管时代，70 年代又迈进了集成电路时代，而 80 年代以后则进入了近代通信技术领域，包括：微波通信、光纤通信、数字通信、图象通信、卫星通信及计算机联网通信等。

当无线电报蓬勃发展的时候，无线电话和无线电广播却还没有出现，这其中当然存在技术问题，因为无线电话和无线电广播在技术上比无线电报要复杂得多，尽管在 1906 年，真空三极管发明后，利用三极管作放大的电路技术得到了解决，紧接着负反馈电路技术、再生振荡电路技术及 1912 年发明的外差和超外差电路技术，这些构成无线电基础的电路在 1913 年前都取得了专利权，应该说无线电话和无线电广播就应该问世了，但还存在一些另外的原因，这些因素是：第一，对三极管的改进需要进行大量工作(譬如需要研究较好的真空泵)；第二，政府希望将这些新的技术保留起来用于军事目的；第三，有关真空管及其电路的专利权为几个不同的公司所掌握。因此只有在第一次世界大战后，在这些公司同意集中使用这一系列电路技术专利后，无线电话和无线电广播才迅速发展起来。

无线电发射和接收设备技术主要在于发送设备技术，下面我们介绍发射设备几个关键技术的发展过程。

1. 大功率源

1899 年德国物理学家 K. 布拉温把火花放电器移到与天线耦合的闭合回路中去，从而改进了波波夫的电路。紧接着，快速消电离火花放电器 (M. 维恩的反复放电器和马可尼的旋转放电器)

的采用，出现了大大提高火花放电器功率的可能性，在此基础上，马可尼于 1900 年在普尔杜建立了世界上第一座大功率无线电发射台。

但是随着火花发射机数量的增加及其功率的增大，火花发射机的减幅振荡存在的缺点也显得越来越严重：由于频带很宽而互相干扰；起始振荡时电压很高而天线绝缘困难；不可能发送无线电话等。在 1900～1910 年中，火花发射机开始受到等幅振荡发射机——电弧发射机和高频发电机式发射机的排挤。

开始时，以电弧发射机为主，其功率高达 1 500 千瓦，能保证无线电报通信距离达 10 000 千米。后来高频发电机式发射机占了优势，因为它的效率较高，频率较稳定，并且没有附带的辐射。在短时间内曾试制出了几种高频发电机式发射机，在大多数的高频发电机式发射机中，频率不超过 20 千赫，因此无线电通信所需的频率是使用倍频器获得的。因为倍频必定有功率损耗，所以高频发电机式发射机和电弧发射机一样，主要适用于长波工作。

1906 年，真空三极管被研制出来，而第一次利用电子管产生高频振荡的是在 1913 年由德国的麦斯南所发明的。之后，便肯定了电子管可以产生频率很稳定的振荡，并且波段很宽，从长波一直到波长极短的波。此外，用电子管发射机实现无线电话调制比用电弧发射机和高频发电机式发射机容易得多，失真也小。

在第一次世界大战后，开始采用电子管的小功率发射（主要是中波的）来进行无线电报通信、无线电话通信和无线电广播。在此期间，又出现了无线电爱好者们所装设的小功率发射机，那时分配给他们使用的频率是未被利用的短波段。

当时大多数的无线电技术专家认为：电子管将只限于在小功率的发送设备上使用，而远距离通信（当时只用长波）将还是采用高频发电机式发射机。并且，在 20 世纪 20 年代还曾经有人试

图制造中波无线电广播的高频发电机式发射机。但在 1919 年，M. A. 邦奇·布鲁耶维奇等技术工作者采用了电子管的水冷方式，证明了制造大功率管是可能的，1923 年就制造成功了功率为 25 千瓦的发射管，1924～1925 年又制成了功率为 100 千瓦的发射管。在业务无线电通信中，短波排挤了长波，高频发电机式发射机的制造便中止了。

在制造新型电子管无线电发送设备中，关键问题是电子管振荡器的计算方法。开始时建立了图解法，但此法较麻烦，不便于工程实践。接着专家们创立了微变等效电路法，将电子管特性曲线理想化，看成直线。以后几年中在这种理想化的基础上创立了很简单的并且相当准确的电子管振荡器计算法。1936 年，原苏联的 А. И. 别尔格创立了振荡器各种工作状态的严格计算法，从而使直线理想化的方法达到了十分完善的地步。

在 20 世纪 20 年代中期，电子管发射机只是做成单级自激电路。随着发射机数量的增加，对其频率稳定度的要求也提高了，于是开始用 2～3 级的电路代替单级的电路，以后又采用具有频率稳定度更高的小功率激励器的多级电路。

只有在波长长于 500～1 000 米的发射机中才容易改用它激振荡，在较短的波长上问题就很复杂了：电子管的极间电容和引出线上的电感产生了各级输出电路和输入电路间的寄生耦合，破坏了它们的正常工作。在短波波段上，寄生耦合引起了各级的自激振荡。为了消除寄生耦合，在 20 世纪 20 年代的末期制成了带帘栅极的发射管——四极管，以后又制成了五极管。但实验证实，当频率相当高和功率相当大时，帘栅由于自己的引出线的电感而丧失了作用。因此帘栅管的应用范围仅限于频率范围在 30 兆赫以下和功率约 1 千瓦上。

为了消除三极管发射机各级间的寄生耦合，开始时采用了中

和电路，这种电路在无线电接收技术中为大家所熟悉，但这种电路不太适用于短波宽波段，因为它们只是在某一频带内使高频放大器输入电路和输出电路去耦，如果超出这一频带范围，寄生耦合甚至会加强。后来，专家们提出了另外一种中和线路可以使短波的放大较稳定。但是总的看来，高频大功率放大器的工作稳定问题，特别是在短波段和超短波段，当时还未能得到彻底的解决。

在无线电调制上，为了得到稳定的直线性，在单级的无线电发射机中采用了屏极调制（如图 1.2-1）。随着它激式的采用和功率的增大，采用小功率极的栅极调制或屏极调制，并在以后几级中放大已调波，可较容易地保证其失真不大。这样，在 20 世纪 30 年代初期各处都采用了已调波放大制。但是随着无线电广播发射机功率的逐渐增大，已调波放大制的缺点也开始表现得越来越严重：发射机的效率低（不大于 20%），因而电子管的额定功率一定要大。

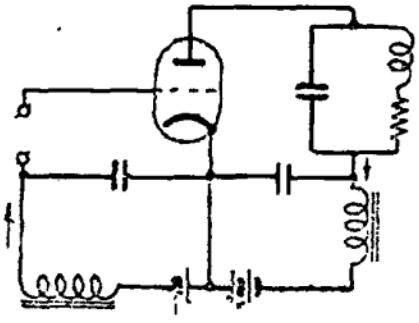


图 1.2-1 自动屏极调制电路

寻求新的效率更高的技术的结果，又回到了发射机末级的屏极调制法，但这时是用 B 类推挽电路的大功率调制器。在 20 世纪 30 年代中期，“B 类屏极调制”开始排挤已调波放大制。也曾有人设法保留已调波放大制而进行过研究，为此采用了陶希蒂的复杂电路的已调波大功率放大法（如图 1.2-2）以提高放大器的效率，结果得到了一定改善，但是为了充分地利用这种电路的能量优点又引起了比一般已调波放大制更大的非直线性失真，为了消除这个弊端，不得不采用强负反馈方法。

自 1919 年以来，在原苏联的 M. A 邦奇·布鲁耶维奇等学者

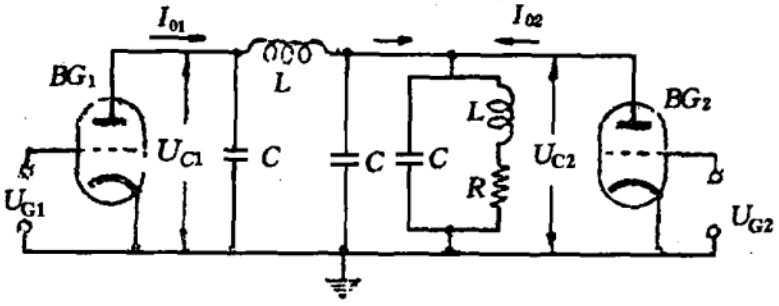


图 1.2-2　陶希蒂放大器的原理图

的努力下，为建设大功率无线电广播电台奠定了基础。1922 年在原苏联建成了 12 千瓦的无线电台，1927 年建成了 40 千瓦的无线电台，这两个无线电台当时是世界上功率最大的。接着在 1929 年建成了欧洲最大的 100 千瓦的无线电台，1932 年建成了 500 千瓦的无线电台，1938 年建成了 120 千瓦的短波无线电广播电台，在当时来说，后面这两个电台也是世界上功率最大的。因而在第二次世界大战的前夜，无线电发送设备的技术，无论在长波、中波和短波上，都达到了比较完善的地步。而且在第二次世界大战中，原苏联还建造了一座到 20 世纪 50 年代还是世界上功率最大的中波无线电台。

2. 高频放大

1929 年，M. A. 邦奇·布鲁耶维奇曾经建议，为了消除屏栅电容的有害影响，应使用“栅极接地”（共栅极）电路来安装高频放大器。这种电路与普通的共阴极电路不同，栅极上的高频可以经由旁路电容 C_{co} 而接地，这时的输出电路接在屏极和栅极之间。比较这两种电路可以看出，在共栅极电路中输入电路和输出电路间的寄生耦合弱得多了，这些寄生耦合是由屏极电容 C_{ak} 和栅极引出线的电感 L_c 所构成的，此电容比共阴极电路的屏栅电容小得多，而电感也比阴极引出线的电感 L_k 小得多。

但是共栅极电路由于一些特点却未获得广泛的应用，这些特点当时被认为是重大的缺点：(1) 因为笨重的灯丝电源不能在高频范围内被绝缘，所以必须用高频扼流圈把它与处于高频电位的阴极连接起来；(2) 因为要额外消耗激励功率（消耗在输出电路中的功率），所以电路的功率放大不明显；(3) 屏极调制比栅极调制稍为复杂些。

但是，瑕不掩瑜，技术的发展肯定了这些缺点比起电路的巨大优点来说是不重要的。例如，当栅极接地电容C_{co}有一定数值时，就能保证在一定的波段内不需采用其他专门的中和措施便能稳定地放大。并且屏极电路的起始电容几乎减小一半，这样便可以调谐到更短的波长。

为了更有效地利用共栅极电路的优点，第二次世界大战后人们在发射管结构和制造上做了改进，制成了一种“平脚”的有特别结构的功率三极管，在这种三极管中，栅极是屏极和阴极间的很好的屏蔽（电容C_{ak}很小）；由于使用环状引出端，故栅极电感也很小，经验证明，这种电子管能保证米波的稳定放大，并且旁路电容C_{co}也不需要苛刻选择了。

在小功率和中等功率各级中主要是用一种在结构上经过改进的平板脚五极管，这种改进减小了引出线的电感，由此而达到的第二和第三栅极屏蔽作用的改善，使得用振荡五极管在米波进行放大也成为可能。在更高的频率范围保证稳定的放大则采用双帘栅管。

在中波发射机中，功率放大级照旧用三极管加中和电路。欧洲大多数国家采用更便于中和的并能减弱偶次谐波的推挽电路，美国常用单端电路并用简陋的屏栅电容谐振中和法。

在短波和超短波发射机中，一般需经过反复的调谐后才能保证中和级的稳定工作。同时，由于有中和电容器，谐振电路中的

起始电容剧增，因而波段被压缩，并减低发射机在最短波长的功率和效率。

20 世纪 50 年代后，在短波和超短波发射机中，共栅极的电路已经排挤了中和放大电路。不调谐式高频放大过去是用于发射机的小功率级，但采用阴极输出器电路和新的磁性材料后，就可以合理地装成不调谐式大功率放大器。例如，在 20 世纪 50 年代后的长波发射机中，除末级以外的各级都没有谐振电路。在整个波段内调谐的简化足可补偿增加放大级数的缺点。

3. 调幅无线电发射机

实际上用无线电广播声音从 1906 年真空三极管发明以后就开始了，那是这一年的圣诞节前夕，加拿大的一位美国人雷金纳尔德·A. 费森登（Reginald. A. Fessenden）在马萨诸塞州布兰特岩城他的实验室里，做了有史以来的第一次调幅无线电广播尝试。这次使用的是一台 50kHz 的射频振荡器，产生约 1kW 的功率，这台振荡器是在 E. F. W. 亚历山大森博士指导下，由中央电气公司制作的。调制是用传声器完成的，据说使用了水冷及天线技术。这次广播中播送了圣经中的圣诞故事、一支歌曲和一支小提琴独奏曲，最后还祝贺大家圣诞快乐。虽然前后只有几分钟，但被当时四处分散的持有接收机的人们清晰地收听到了，它给收听惯了莫尔斯电码的人们以深刻的印象和莫大的喜悦。

无线电广播的初期发展非常缓慢，一是因为当时设备很不完善，二是公众对此还没有什么认识。在第一次世界大战期间，由于军事上的需要，无线电被广泛使用，加上人们对于大功率发射机和高灵敏度电子管接收机技能的掌握使无线电广播得到了很大的发展，各个国家纷纷建立广播电台，1920 年 6 月 15 日，马可尼公司在英国举办了一次以梅尔芭太太主演的“无线电——电话”音乐会，远在巴黎、意大利、挪威、甚至在希腊都能清晰地收听到。

在原苏联，于1919年制造了一台大功率发射机，并于1920年在尼惹城开始试验性广播，所用波长为1 200米和1 500米。在德国，柯尼武斯特豪森广播电台于1920年12月22日首次播送了器乐演奏音乐会。在美国，1920年11月2日，在弗兰克·康拉德(Frank Conrad)的领导下，威斯汀豪斯公司广播站KDKA开始广播，首次播送的节目是哈丁·科克斯(Harding Cox)总统选举，这事曾轰动一时。不久，加拿大、新西兰、澳大利亚、法国和其他国家都纷纷建立无线电电台，开始了广播。

在以后的时间里，调幅无线电广播技术主要是在功率、效率和消除失真上进行提高和改进。第二次世界大战后，调幅广播发射机主要用乙类屏极调制。在发射机高频末级进行屏极调制时，效率较高而非线性失真很小。当在一个波段中工作时，栅极高频激励电压和屏极负载的变化对它的指标很少影响。调制装置是一个推挽电路的多级声频放大器，末级—调幅器—工作于高效率的乙类，其输出功率约等于发射机额定功率的75%，调幅设备内的强负反馈使调幅器的失真小，输出电压稳定。因此，在一个波段中的各个波长上发射机的调制度相同。

到20世纪50年代，乙类屏极调制的发射机的能量指标和电声指标都大大提高了。大功率无线电广播发射机的总效率可达45%～50%，在95%调制时，非线性失真约2%，寄生调制电平小于0.1%，在50～10 000赫的频带中频率失真极小。之所以获得这样大的提高和改善是在技术上一般采用了下列措施：(1) 副调制器采用阴极输出电路代替它过去所用的变压器耦合放大电路，不用副调制变压器便大大简化了在调制设备中使用强负反馈的问题；(2) 有效地抑制了调制变压器电路中的超声频谐波，其方法是把它接成带通滤波器电路；(3) 除了高频末级的屏极调制外，还采用激励电路的附加调制。例如：在共栅极高频放大电路

的短波发射机中，在末级的前置级中进行补充调制，这样便可以减小其电子的功率，保证更好的直线性调制等（为了这个目的，有时在中波发射机中也在末级的前一级进行调制）。在五极管发射机中时常采用屏极——帘栅极调制。

美国和西欧在当时还继续采用 B. 陶希蒂的已调波放大制的高频功率放大器的中波无线电广播发射机。该发射机的两只电子管均工作于乙类放大，相互交替工作，由于可以利用全部屏极电压工作，因而具有高的效率。但因在倒相电路中有频率失真，只有在相当窄的旁频带内才能保持电子管正确交替地工作。当波长大于 500～600 米时，用高声频进行调制可能产生严重失真，而且，这种放大电路的发射机由于改调较复杂而不适于在可变频率中工作。这种发射机的能量比乙类屏极调制要差一些。

后来，美国在频率改调工作上加以改进，克服了改调较复杂的缺点，制出了 500 千瓦的发射机。当其没有调制时，总效率为 50%；当有 100%的调制时，总效率可提高到 54%。当工作波长小于 550 米时，60～4 000 赫频带内的非直线性失真不超过 2%；当工作波长大于 1 000 米时，非直线性失真便增加。

与此同时，原苏联无线电专家也推出一种自动屏极调制电路，该调制基本电路为：把在前置级的任一级中已调制过的高频振荡加到发射机末级的栅极上。在其屏极供电电路中和栅偏压电路中加有大电感的扼流圈 L_{am}和 L_{cm}，因此，在调制过程中直流屏极电流和直流栅极电流不变（与其他的调幅方法不同）。

由于扼流圈的作用，可得到这样的结果，当激励最大时，电子管屏极电流脉冲截止角应当最小；当激励最小时，应当最大。如果在屏极供电电路中没有扼流圈 L_{am}，则电子管的直流屏极电流 I_{a0}也将随激励的调制电压 U_c 成反向变化。由于有扼流圈 L_{am}存在，电流 I_{a0}应当保持不变，这是由于在扼流圈 L_{am}中产生声频电压

U_r的缘故，此电压在调制正半周增高屏极电压（E_a+U_r），而在负半周则减低屏极电压。这样由于有扼流圈L_{cm}和L_{am}，高频激励的调制便自动引起反相栅极调制和同相屏极（自动屏极的）调制。在工作过程中，屏极电流基波I_{a1}的调制会出现严重失真，为了消除这种失真，电子管的栅极激励应当用人工法所产生的反向失真来调制，或在已调波的各级采用强负反馈方法。这种自动屏极调制可以用于可均匀改变频率的发射机中。在采用自动屏极调制时，高频末级电子管的输出功率几乎与采用屏极调制时一样。与乙类屏极调制比较，它不需要大功率的调制器，因而在体积和设备价值等方面都令人满意，总的能量消耗约与乙类屏极调制时相同。这种调制后来一直在发展。

4. 稳频

随着无线电广播事业的发展，电台迅速增加，针对这种空中通道日益拥挤的现象，采用压缩接收机通频带宽度的方法来提高接收机抗干扰性的能力显得非常必要，加上许多工作要求不经寻找频率即可进行联络等，这些问题都迫切地要求人们应不断地提高发射机的频率稳定度。

一个发射机的可均匀改变频率的激励器就是具有振荡电路并用可变电容器或可变电感器进行调谐的自激振荡器。自激振荡器的振荡频率稳定度决定于：固有频率的稳定度；振荡电路的优值；电子管工作状态的恒定性；频率较准的准确度。这种振荡器的频率稳定度一般比较低，不过经过不断的改进，在第二次世界大战以前已将这种可均匀改变频率的激励器的频率稳定度提高到$(2\sim3)\times10^{-4}$。

而用晶体片做成的振荡电路，是一种单一频率的振荡器（如图 1.2-3）。这种单一频率的石英晶体振荡器早在 1921 年即为美国的卡第所发明。使用这种晶体振荡器可以获得较高的频率稳定

度，不过振荡器只能产生单一频率。在一般情况下它所达到的频率稳定度比可调振荡电路振荡器的稳定度要大 1～2 个量级。

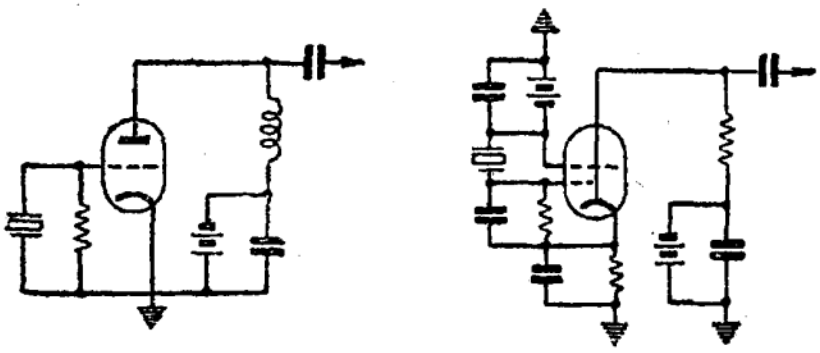


图 1.2-3　晶体自激振荡器的电路

在 1933 年，原苏联的 Г. А 翟特辽诺克曾提出一种利用石英晶体器来改善可均匀改变频率的波段中频率稳定度的方法，即用高稳定度晶体振荡器的频率 f_0 与可均匀改变频率的振荡器的低得多的频率 F 进行混频。这时，混频器输出端的频率 $f=f_0\pm F$ 是在后一个振荡器的频率范围内变化的，这个频率的稳定度可达到与频率 f_0 的稳定度同一量级。但是这种在一个波段内稳定频率的电路法的实际应用受到了限制，因为在混频器的输出端产生大量的与标称频率 f 接近的副波频率：$f_0\pm 2F$、$f_0\pm 3F$……等，这些频率不能被发射机后几级滤掉，因而会被辐射到天空中去。

由于在第二次世界大战期间及以后多年的研究，可均匀改变频率的激励器和单一频率晶体激励器的频率稳定度提高了 10 倍以上。在变频激励器和晶体激励器中，自激振荡器通常都是接成电子耦合振荡电路、振荡电路接在五极管的控制栅和帘栅之间，而在屏极电路中用非调谐电路即用电阻、电容耦合将振荡放大。电子耦合振荡电路可以减弱电子管本身和发射机以后几级的破坏稳定的作用。

对晶体本身稳定方面的工作首先是在晶体制造方面做了改进，在所采用的切片方法中，温度对晶体片频率的影响是很小的，破坏稳定的主要因素不是温度而是晶体片的老化。后来采用了凸透镜形的晶体片。其特点是只有一个频率而且优值很高（10^5～10^6）。对晶体激励器电路的更进一步的研究表明：晶体自激振荡器的频率漂移，是由于晶体上并联了电子管和电路的其他元件的不稳定电容而产生的。

在这以前，晶体自激振荡器常采用将晶体接在栅极和阴极之间的“谐振电路”式接法，而战后多采用了“非谐振电路”式接法，即将晶体接在控制栅和屏极或帘栅之间，如果使用比较稳定的零件，这种电路能保证足够高的频率稳定度，约达 10^{-6}。

对晶体电路的分析证明：它有两个“频率”，一个是“并联”谐振频率，一个是“串联”谐振频率，在这两个频率中，电路的等效阻抗是电阻性的，并且不稳定电容的变化对“并联”谐振频率的影响比对“串联”谐振频率的影响大得多，因此应用串联谐振将对进一步提高频率稳定度有一定好处。20 世纪 50 年代中期在高稳定度的振荡器中常采用美国米切姆在 1938 年所提出的桥式晶体振荡器电路，在这种电路中晶体工作于串联谐振状态。这种电路能保证频率稳定度约为 10^{-7}～10^{-8}。

在整个波段中的频率稳定方面，用电路法也取得了很大的成绩——使副波的频率非常弱，同时由于应用了更稳定的自激振荡器，也提高了频率稳定度。

5. 单边带通信

所谓单边带通信就是指当无线电广播和无线电电话通信使用普通的调幅制度时，发射机只发送调幅波信号中除载频外上、下边频的一个边带（$f+F$ 或 $f-F$）信号。1915 年，美国卡森已经证明这种单边带通信是可以实现的。到 1920 年调幅无线电广播正

式开播以后，广播台不断增加，特别是1925年短波无线电广播实验成功，接着在以后的几年中短波无线电广播台陆续设立，这就给调幅广播提出了两个问题：一个是发射机功率利用率；另一个是频带压缩。

当时，在无线电广播中使用调幅方法时，发射机功率的利用率不大：不断发送的载频 f 在接收机中并没有被利用，收听效应仅是由边带（$f\pm F$）产生的。单边带发射只发送一个边带（$f+F$ 或 $f-F$）以及为了准确调谐接收机所必需的所谓导频信号，它是一个固定频率（一般是载频 f），并且其振幅不大，约为最大振幅的10%左右。

在有载频的普通调制中，边频的总振幅达最大振幅的0.5，用单边带发送时，边频的振幅达最大振幅的0.9，这样，功率增益达3倍，由于频带压缩到原有的1/2，所以采用单边带发射可以相应地提高接收机的选择性，这样，发射的附加功率增益又达2倍。因此，当所接收的信号强度相同时，单边带发射机的功率只是普通发射机的1/6。

在消耗功率方面所进行的比较表明，单边带发射更有利——在响度相同的情况下，单边带发射机所消耗的平均功率约为乙类屏极调制或自动屏极调制发射机所消耗的功率的1/10。

如果用普通调制的发射机来发送多路电话和电报，由于必需加宽发射机所占用的频带以及其功率的利用率很小，所以并没有得到多大的成功。但应用单边带接收机，则可得到大得多的能量效果。此外，多路发射可以使频带挤得更紧——当用一路的发射机时，在发射机占用的频带间必须留出不用的频率间隔，这个间隔要超过其激励器的可能频率漂移。而当多路发射时因为高频激励器是各路所共有的，所以，所有相邻信路间的间隔可以压缩。

在当时的短波发射机技术上，比较复杂的问题是将一个边带

与频差极小的载频 f 和第二个边带分开。如：在波长 30 米用频率 100 赫调制时，必须将 10 000 100 赫的边带与载频 10 000 000 赫和第二个边带 9 999 900 赫分开。

为了抑制载频 f，专家们使用了平衡调制，这种调制基于两个反相已调波的相减。同样为了将频率非常相近的频带分开采用了重复平衡调制或正交平衡调制方法。

20 世纪 50 年代期间，在短波多路通信方面的功率利用问题上取得了重大的成就。

在多路工作时，单边带发射和功率的利用有着密切的联系，因而在采用单边带发射保证失真小而功率又能充分利用就是一个很重要的问题。

多路工作时，当 N 路的功率相同，每路的振幅不会大于一路工作时最大振幅的 $1/N$，相应地，每路的功率不会大于一路工作时功率的 $1/N^2$，因而各路的总功率为发射机功率的 $1/N$。

因为各路同时用最大音量工作的几率是很小的，所以采用压缩设备，把各路振幅的和保持在接近于最大振幅的水平，便可以大大改善发射机功率的利用；这时，每一路都可以用大得多的功率工作：如果在某一瞬间一路用高电平工作，其他各路用低电平工作，则高电平这路的功率几乎等于发射机的功率。在这种情况下动态范围的减小对发送来说并不重要，重要的只在于实现非直线性失真的压缩。

当多路发射时，要求在发射机后面几级的放大有很好的直线性，否则会产生不容许的交叉失真，而造成各路间的相互干扰。在功率不大的各级中，可以像在低频放大器中一样，使电子管工作于其特性曲线的直线部分(甲类放大)。从而保证得到直线性放大。这些级中虽然电子管的利用率小而效率低，但对发射机的能量平衡不会有多大的影响。

如果发射机功率级用甲类放大，则将使单边带发射机的能量方面的优点全都消失。因此，在这些级中电子管应当以乙类工作，即采用半波的高频屏极电流脉冲工作。但是，在这种情况下很难保证弱信号的直线性放大，因为这时电子管工作于其特性曲线的下面的弯曲部分。这种非直线性特性可以采用负反馈来消除。采用压缩方法时由于增大了各路的总振幅，也使得特性曲线下端非直线性所引起的交叉失真减弱。

6. 调频发射机与调频广播

调幅方法中的信号容易受到干扰信号如雷电等的幅度调制而给信号带来噪音，调频方法就可以消除这些干扰而大大提高接收机的抗干扰性，另外由于调频方法所发射的声音振荡的频率范围较大，所以声音的保真性比较强，美国人称这种特性为高保真度。因此调频方法被广泛用于音乐广播，在超短波无线电话和广播方面也广为应用，特别是用作电视节目中的伴音播送。

1933 年，阿姆斯特朗（Edvin H. Armstrong）对调频原理进行了证明，并于 1935 年 4 月实验成功。然而，关于调频法的优越性在以后的几年中并没有引起足够的重视，甚至在第二次世界大战的前几年，阿姆斯特朗也很难分到实验用的无线电频段。虽然在日本，1939 年在 VHF 波段开始了调频广播，1941 年，最早期的调频广播网也开始了工作，在美国于 1941 年也开始了商业调频广播，然而一直到第二次世界大战以后，它的系统在优良的接收质量（特别是音乐）方面有巨大的价值才得到证实，并为人们所接受，同时这些收音机也相继地不断简化，到 1950 年，所有工业国都开设了调频广播。电视伴音也采用调频制。

调频发射机从开始到以后的十多年中，在技术上一般采用下述两种方法来得到高频振荡的调频：(1) 改变自激振荡器的电路参数；(2) 先得到调相，再变调相为调频。

在前一种方法中，一般借助于电抗管来实现，电抗管接在自激振荡器的振荡电路上，如图（1.2-4），它的作用像一个随调制频率 F 而变的电抗，为此就必须使电抗管的栅极之一的电压受到调制。这种电路的载频 f_0 一般为 5～6 兆赫，并且不难得到失真很小的调频。但保证激励器的中心频率 f_0 的不变却难得多，问题在于把电抗管接到自激振荡器的振荡电路上会降低频率稳定度，用这种方法可能会使得由于这个原因引起的频率 f_0 的漂移大大超过调频所要求的频移 Δf_0。

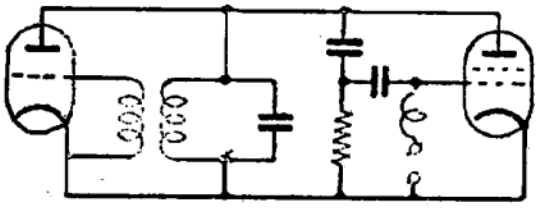


图 1.2-4 用电抗管调频

为了保证中心频率所要求的稳定度，采用过各种自动频率控制电路，这些电路是基于自激振荡器的中心频率与晶体自激振荡器的频率相比较。开始时比较频率是用鉴频器，用它的输出电压借助于电抗管来控制自激振荡器的频率 f_0，后来经过不断改进，这种鉴频器被性能更好的相敏检波器所取代，因而得到了更完善的自动频率控制电路。

在后一种方法中，由于已调相波与已调频波有一样的特性，所以被频率 F 调制并且相移为 $\Delta\Phi$ 的已调相波与频移为 $\Delta f=\Delta\Phi F$ 的已调频波相同。

为了使各种调制频率 F 的频移 Δf 都一样，相移 $\Delta\Phi$ 应当随频率 F 成反比地变化。因此，如能使调制电压随频率 F 成反比地变化，则可以变调相的设备为调频的设备。这个变化一般是在声频输入端用 RC 积分电路实现的。

最初的调相法是基于把调幅变为调相：1932 年，Г. А. 翟特辽诺克和 Е. И. 卡明斯基采用了使两个反相已调高频振荡在正交电

路中相加的电路；1935 年，阿姆斯特朗采用了使未调振荡与旁频振荡在正交电路中相加的电路。用这些方法可以得到失真小的调相。但是用调相进行调频则需要极为笨重的多电子管的激励器。

二战后曾试制了专门的调相管，用它们可以得到大相移的调制，但是由于过于复杂，故在实际中并未获得推广应用。而应用比较广泛的是脉冲相位法和 A.Д．阿尔迪姆方法，前者来自脉冲技术而后者基于以几个非线性已调幅的并互有相位差的高频振荡相加。

20 世纪 50 年代后在所用的调频无线电广播发射机中，主要的是采用调相激励器。它们比直接调频激励器简单，并且使用起来也比较可靠。

2.3　接收机

从技术发展上看，无线电接收机的发展道路显然要比发射机简单、容易得多。它主要是在不断改善质量指标、扩大无线电接收设备应用范围和波长范围而进行创新和改进。其质量指标是指：灵敏度、抗干扰性、保真度和工作可靠性等几个方面；波长范围已从最早的长波发展到中波、短波、超短波（米波、分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波）和目前使用光纤通信的红外无线电波；应用范围由无线电报、无线电话、传真、无线电广播、电视发展到无线电导航、雷达、无线电遥控、遥感、射电天文学、制导和电子对抗等许多方面。

当 1906 年无线电发射机做第一次声音和音乐的广播时，便有了无线电的接收机，当时只是最简易的矿石检波器。接着在 1907 年，德福雷斯特首先利用电子管做成屏极检波接收电路，这是第一部电子管接收机，但还没有放大作用。

1911 年，这时已经出现了真空电子管的放大电路。德雷福斯

特、阿姆斯特朗和兰米尔于美国在放大电路的基础上制作了再生式电路，这种电路使射频能量由板极电路反馈到栅极电路，给出载频正反馈，从而增大了电路的灵敏度，使小信号的增益得到比较大的提高。使得接收机灵敏度大大地推进了一步。在同一时期，德国的迈斯纳也在进行同样的工作，并取得了同样的成果。

1912 年，美国的 H. M. 费森登（H. M. Fessenden）和 E. H. 阿姆斯特朗在改进接收机的研究中，发明了外差式接收系统，这种系统是利用接收的信号和本机振荡的混频，然后获得了两者的差频信号，这是超外差接收机的前身。紧接着他们又加上中频放大电路，利用了双检波技术，形成了比较完整的超外差接收电路，为后来的接收机技术奠定了重要基础。在当时，此项工作在美国和欧洲之间几乎平行发展，除前面两人外，还有 J. H. 汉蒙（J. H. Hammon），A. 麦斯纳（A. Meissner）、卢辛·列维（Lucian Levy），E. F. 亚历山大森（E. F. Alexanderson）等人，他们的工作业绩都很突出，很难确定谁是发明者。但是后来在 1920 年阿姆斯特朗获得了该项专利。

在以后这段时期内，主要工作是对频率特性、非线性失真、稳定度和抗干扰能力的改进和提高，这些因素对音质都有重要的影响，其中稳定度涉及接收机中音响系统的不稳定过程和本地振荡器的稳定性问题。

1927 年，H. S 布莱克（H. S. Black）在贝尔实验室发现把一个放大器输出的一部分反馈到输入端（负反馈），则能够靠牺牲一些增益达到在低失真度下稳定工作，这就是通信技术上的重要电路之一的负反馈电路。它对减小由于频率特性和非线性引起的失真以及消除不稳定过程引起的失真都起着重大的作用。

1926 年，美国的 H. A. 惠勒（H. A. Wheeler）发明了自动控制电路，该项内容迟至 1929 年 9 月才公开发表。他将此项电路用

于接收机的前两级射频管，以防止第三级的失真。这种电路对消除接收机特别是短波段接收机的音量起伏起着重要作用，从而保证了对音质的改善。此外采用阴极输出级电路、晶体自动频率控制系统、抗干扰电路、各种滤波系统及优质、稳定的元器件使接收机获得了很大的改善。在第二次世界大战前已经出现了质地优良的各种类型接收机，而且应用范围也很广泛。

第二次世界大战以后，特别是在晶体管和集成块出现以后，根据各个领域对功能的不同要求，接收机主要在高灵敏度、高保真度、数字化和小型化等几方面被加以改进和提高，然后被广泛应用于通信、工业、国防和医学等各个领域。

第三章 电波传播与天线

3.1 电波传播理论的发展

1899 年 7 月，马可尼的通信系统在三艘英国军舰上进行了通信试验，试验中发现无线电信号可以“绕过”地球进行曲面传播，经过反复试验，证明该现象的确是事实。1902 年，英国的亥维赛和美国的肯尼生根据前面的事实提出了在大气圈中有电离层存在。在以后的时间里，专家们注意到，在所有的频率上，电磁能量都能衍射到障碍物后面的几何阴影中去。衍射能量随频率的减小而增加，在射频的范围内，通过衍射可以在超出几何地平线的阴影区产生相当大的有用信号场强。曾经有很多数学家从事计算在地球阴影区内衍射场强的数学问题，但一直过了 15 年，还得不到一致的答案。到 1918 年，沃特森首次做出了有一定意义的突破。他指出：由处在导电性良好的球面上的天线所发射的波在远距离处是呈指数衰减的，但是，在这种条件下由沃特森所预测的场强

数值却远小于已知的实测值。这种矛盾更促使人们对电离层倍加注意。加上通信事业的发展，短波广播、微波通信、雷达、电视的传播和其他一系列涉及各个波段电波的传播问题都迫切需要理论上的指导和解决，这些问题的解决促进了电波传播学说和天线技术的快速发展。

1. 地波的传播

(1) 近似边界条件。地波的传播是电波传播的方式之一，特别是在长、中波段。然而关于无线电波在空气与地球的半导体性表面的分界面上的传播过程进行严格的计算，是无线电通信发展几十年来在数学物理中最困难的问题之一。由于数学计算复杂，以致于仅在某些简单的情况下这个问题才能得到适用于工程实践的解。这个近似解是必须满足一定条件的，这个条件就是 M. A. 列昂托维奇在 1948 年所确立的近似边界条件

$$\sqrt{\varepsilon'^2 + (60\lambda\delta)^2} \gg 1,$$

式中：δ——无线电波在其上传播的土壤的电导率，单位为 $\frac{1}{\text{欧}\cdot\text{米}}$；$\varepsilon'$——相对介电常数；$\lambda$——空气中的波长，单位为米。

这个近似边界条件具有很重要的意义。应用这个条件，可以使许多早已存在的关于地波传播问题的解法大为简化，并且使一些在这以前还未经研究的新问题得到解决。利用这个近似边界条件 M. A 列昂托维奇和 B. A 福克终于成功地将无线电波沿地球绕射的问题简化成抛物线型的微分方程式。

(2) 关于“起飞”和“着陆”场的概念。地波传播的早期理论家认为，在地球表面上传播的无线电波的吸收机构大体上与沿长线传播的电流波的吸收机构相似，无论每段导线所处位置如何，总有其构成总吸收量的相当部分吸收量。Л. И. 曼杰里斯坦纠正了这种论点，他将地波传播过程在一定程度与飞机的飞行相比拟，

他认为：飞机从发射机所在处起飞，在离开地球表面的一定高度上向接收点方向飞行，最后到设有接收天线的区域着陆。那么在“起飞”和“着陆”的区域内，飞机离地面不高，无线电波与地面作用大，所以吸收量也大，因此，无线电波在传播过程中产生的吸收作用是不一样的，只有在靠近发射天线和接收天线地段上的吸收最大，后来严格的理论也证实了这一点。

1940 年，П. А. 利维津研究地波传播速度，根据上述观点得出了类似的结果：地波传播的速度只在“起飞”场和“着陆”场区与土壤的种类有关，这个结论为许多国家所做的一系列实验所证实。

（3）无线电波的岸折射。从第一次世界大战开始使用无线电探向台的时候起，人们就知道，与无线电波斜交通过海岸线时，像光波从一种介质进入另一种介质时一样产生折射，从而使电波传播的方向发生变化，由此势必导致无线电探向发生误差，因此计算这种误差就具有重要的实际意义。

在 1919 年，英国科学家爱凯尔思豪就曾试图直接利用折射定律来计算电波传播的偏向角，其结果是：所得到的偏向角不仅绝对值与观察的数值不符，而且其偏折方向也不对。

由于前面的研究假设与“起飞”、“着陆”观点不一样，所以，导致了错误的结果。因为无线电波传播速度只有在发射天线和接收天线区域随土壤的种类变化，因而岸折射现象特别强。如果无线电波通过海岸线是在相当长的线路中段时，传播速度几乎不随土壤的种类变化，因而岸折射的现象一定是很小的。

根据 20 世纪 50 年代所建立的相当严格的岸折射理论，充分证明了上述论述的正确。从严格的计算公式表明，岸折射现象实际上只是无线电波的电场的局部扰动，引起的探向误差只发生在离海岸线不远的地方。

（4）无线电波在不均匀路线上的传播。在各种不同的土壤上面通过的无线电通信线被称为不均匀路线。显然，实际上遇到的情况绝大多数都是不均匀路线。因此能否计算这种情况下的电场，就具有非常重要的实际意义。

20 世纪 50 年代以前，计算不均匀路线上的地波电场还是普遍应用爱凯尔斯莱的方法。这个方法不严格，因为它不能满足互易定理。换句话说，计算的结果是随电波传播的方向而变化的，这和严格的计算方法不符。

20 世纪 50 年代以后的理论说明爱凯尔斯莱方法的不严格性在于：他硬性假设路线各段上的吸收作用都是一样的，而没有考虑到接近发射和接收区域场的特殊作用。

针对地波在不均匀路线上传播的条件，许多科学家进行了多年的认真研究工作，提出了在这种情况下计算接收点的场强的公式，其结果与实验数据完全符合。

（5）绕射方程式严格解的获得。虽然无线电波绕地球的绕射问题早就引起了许多世界闻名的学者的注意，但是，一直到 20 世纪 40 年代初期，所有提出的计算公式和计算方法只是适用于计算阴影区域（即在直视距离以外的区域）的场强。当通信波段处于长波、中波和短波段时，上述计算公式和方法都没有出现什么问题，这是因为上述波段的无线电波都具有显著的绕射，所以根据无线波在地球平面上传播这一假设而建立的公式实际上也适用于计算阴影区域起始段（即与直视区界限相连的那段）的场强。

但将上述计算公式和方法用于米波和比米波更短的波段时，情况就大不一样了。因为在这个波段的无线电波绕射能力很弱。由于一般用来计算直视区内场强的公式是建立在直射线和地球地面反射线的干涉原理上的，它只能用在不超过直视距离的 70%～80%范围内。而在当时所有的绕射公式也只能用于从直视距离以

外 30%～40%起计算的范围内。这样一来，从 0.7l 到 1.4l 这段范围内（l 表示直线距离）——在一般情况下特别需要知道这范围内的场强——实际上还是没有计算公式的。

直到 1944 年，B. A. 福克才把电波绕地球绕射的问题归纳为级数问题，应用级数求和的新方法，并利用所引入的艾利函数特性，得到了严密的计算离发射机任意远的接收点场强的公式。到这时这个空白才被填补起来，而且运用该公式还可直接导出远离发射机所在处的普通绕射公式和离发射机不远处的反射公式。

1948 年，B. A. 福克与 M. A. 列昂托维奇合作，在利用近似边界条件的基础上将绕射问题归结为解抛物线的微分方程问题，使解决绕射问题得到大大简化。

2. 无线电波的对流层传播

(1) 利用反射公式计算大气的折射。对流层是指大气的下层，大约高至 12～16 千米，它对无线电传播的影响是由于它的不均匀性，因为无线电波在空气中的折射系数是随大气压力、温度和湿度而变化的，而气压、温度和湿度随高度变化，因而空气的折射系数也随高度而变。

在 1933 年已经得出，在应用反射公式来计算大气折射的影响时可以用地球半径的某一有效值（一般大于实际值）R' 代替计算公式中的实际值 R。R' 的数值由电波实际轨道与地球表面间的相对曲率等于直线射波与有效直径的地球表面间的相对曲率这一条件来决定。

关于是否容许用地球半径有效值代替实际值的问题，专家们证明，对十分倾斜的射线来说，应用地球的半径的概念都是容许的，并且还给出这个概念的应用范围。

1953 年原捷克斯洛伐克科学家贝克曼发表了关于超短波在不均匀大气层中的传播条件的研究成果。

科学家们研究的结果认为，在对流层中，在所谓正常的情况下，空气对无线电波的折射系数 $n=1.000338$，每升高 1 米，折射系数减小 4×10^{-8}。由简单计算可知，这种并不显著的对流层的不均匀性却使射波的轨迹发生了相当显著的弯曲，射波在这种情况下形成向上凸起的、半径为 25 000 千米的圆弧形。对于长波、中波和短波而言，引起射波绕弯曲的地球表面传播的更强而有力的因素是绕射和电离层的反射，而对大气折射所引起的射波在对流层中产生的不显著的弯曲可以忽略不计，但在短于 10 米的波段内无线电波的绕射影响便急剧地减小，更不存在电离层的反射，因此这种由对流层所引起的射波轨道的弯曲即使很小，也必须考虑在内。

（2）利用绕射公式计算大气折射。对于用反射公式来计算大气的折射现象采用了地球有效半径的概念以后，有些学者就在用绕射公式进行计算时也开始采用类似的方法。在 1948 年，B. A. 福克发表的一篇著作中详细地阐述了关于同时计算绕射现象和大气折射现象的问题。他并且证明了，如果空气的折射系数在无线电波绕地球传播的那一区域内的大气层中均匀地变化的话，那么，确实可以用以地球半径有效值代替绕射公式中的实际值的办法，将大气的折射现象考虑在内。在一般情况下，如折射系数是按照比较复杂的规律随高度而变化，则计算地球的有效半径必须采用特殊的公式。

（3）大气折射的各种情况。到 20 世纪 50 年代中期为止，所有科学研究中观察到的折射系数按大气层高度分布的形式可分为下列几类：

①无大气折射　如果气压、温度和空气湿度按某一规律随高度而改变，在这种规律下，折射系数在某一段高度范围内不随高度而变化，那么我们可以说，在这段高度范围内是不存在大气折

射的。在这一区域对流层中无线电波按直线的轨道传播。

②负大气折射　如果在对流层中，气压、温度和湿度随高度而变化的情形使折射系数随高度而增加，那么超短波是按向下凸起的轨道而传播，这时射波好像是离开地球表面。在负折射情况下直视距离以及超短波传播距离都减小。

③正大气折射　当对流层的折射系数随高度而减小时，便出现正大气折射。此时超短波是按向上凸起的轨道传播。正大气折射又可为三种情况：

A. 高度每增加 1 米时空气的折射系数均等减小 4×10^{-8}，这就是所谓的“标准大气折射”。

B. 当高度每增加 1 米时空气的折射系数均等减小 1.57×10^{-7}，这就是所谓的“临界大气折射”，当折射系数值如此迅速地变化时，超短波的轨道成为圆弧形，它的半径等于地球的半径。

C. 当空气的折射系数随高度而减小得比临界折射更快时，这就是所谓的“超折射”。这时对流层的折射能力急剧增加，并且倾斜到一定程度的射波会受到完全的内反射而回到地球表面，在超折射的作用下，超短波的传播距离大大增加。

上述的几种折射波的轨道如图 1.3-1 所示。

当 1944 年 П. Е. 克拉斯努什金在研究无线电波在波导结构中传播的理论时，曾经指出超短波可能在对流层下边的波导结构中远距离传播。过了不到一年的时间，在地球的各个地方的确发现了分米波和厘米波超远距离传播的情况，因而证实了上述理论的正确性。

超折射问题或超短波在大气层波导结构中传播的问题在当时引起了世界各国科学家的注意，许多科学家都进行了这方面的研究工作，从而取得了一系列的成果。

把观察米波和更短的波超距离传播的结果同气象测量的结果

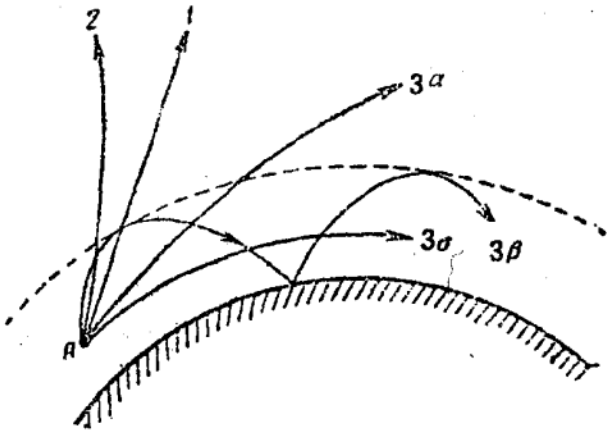


图 1.3-1 在各种类型的大气折射时波的轨道：
1：无大气折射；2：负大气折射；3：正大气折射；
3α：标准大气折射；3σ：临界大气折射；3β：超折射

相比较，证明了超折射现象的发生是由两个过程促成的：气温倒布的出现和空气湿度随高度上升而急剧减小。所谓气温倒布就是气温随高度而变化的关系不遵守常规，也就是在某一段高度范围内，气温不是照例随高度升高而减小而是随高度升高而增加。气温倒布和空气湿度随高度升高而急剧减小的现象都能使空气的折射系数值更快地随高度增加而减小，这也就是超折射现象的原因。

经过详细研究超短波在波导结构中传播的过程后，知道在波导管中传播的无线电波仅在波导结构的高度超过传播的波长数十倍时，才被波导管容纳而进行传播，这样就使得通常形成的大气波导只能远距离传播分米波和厘米波，能够传播米波的高波导结构就少得多。

(4) 米波在对流层中的散射现象。20 世纪 40 年代初期，科学工作者们用超折射现象不能解释超短波段的远距离场强为什么总是大于用绕射公式并计入标准大气折射时计算出的场强，对这一

现象，学者们经过研究后做出了各种解释，其中以无线电波在对流层中散射的理论最合乎实际。

散射理论的主要论点是：许多现象确凿地证明，在对流层中不断地发生气流扰动，也就是空气的不规则运动。气流扰动产生的原因是由于地球表面各个地区的受热和冷却不一致。例如在已耕地段与湖面或割去草的草原受热就不相同。在这些地带上面所产生的气流以不同的速度上升，互相接触和搅合而形成涡流。这时发生的温度变化，即使不大也能引起大气折射系数值同样的少量变化。结果大气层就仿佛具有颗粒似的结构，这些“颗粒”的折射系数值与周围的折射系数值不同，并且它们经常不规则地移动着。当发射机发射出的无线电波到达上述地区时，由于这些微粒结构而发生局部散射，部分散射的射波落在设有接收天线的地方，这样就形成了远距离接收信号的可能性（如图 1.3-2）。由于对流层的涡流经常发生，而且不同的天气仅仅影响各部分（颗粒）的不均匀，所以超过正常的绕射电波传播距离的信号经常能被接收到。

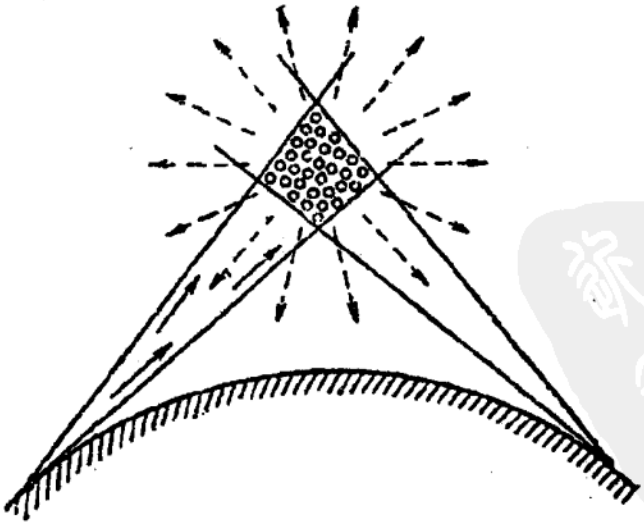


图 1.3-2　米波在对流层中的散射图

3. 无线电波的电离层传播

1902 年英国亥维赛等学者提出电离层存在的说法，22 年以后，英国的阿普尔顿和巴雷特于 1924 年测定了 E 电离层，证明了亥维赛等人的预见。由于短波和微波通信的要求，对电离层的结构及其对无线电波传播的作用和影响的研究工作一直在抓紧进行，并且取得了一系列的重大发展。

(1) 电离层风。在很长时间内，电离层的研究者普遍有这样的看法：仅在空气的下层才有强烈的气流移动，而对电离层内的大气层则认为处于比较稳定的状态。到 20 世纪 50 年代初期，由多年来在世界各个地点所进行综合研究的结果证明这种假设是错误的。到 50 年代中期更进一步肯定了电离层中的电离气团是经常不断地而且是相当快地移动着。这种移动被统称为“电离层风”。太阳热和太阳引力的影响（即电离层中的潮汐现象）是这种移动的主要原因。月亮的潮汐影响在这里仅起着次要的作用。气团的垂直移动也和大气低层的情况一样，一定会引起空气的水平移动。水平移动的速度约每秒数百米，可是垂直移动速度仅达 5 米/秒。

(2) 电离层的起伏过程和电离层的细密结构。早期的电离层观察站的测量结果曾使学者们认为 D、E 和 F_2 层在电离层安静的日子里有着正规的结构，电子密度是从最小向最大做单一变化；20 世纪 50 年代以来，随着电离层测量技术的改进和电离层观测站分辨能力的提高，开始了解到在电离层中是不断发生着起伏现象的，即电子密度值呈不规则的波动。起伏现象的产生，一方面是由于电离辐射的不均匀性；而另一方面则是由于电离空气团涡流（旋风）运动所致。考虑到所有这些因素，我们必然得出这样的结论：电离层有着粗糙的结构，电离层的任何反射都不免带有部分的漫反射。不但如此，射波在不均匀的电离层中传播时，像在“混浊媒质”中一样，会耗散掉一部分能量。

（3）电离层的扰动。破坏短波通信的主要原因是电离层的扰动。所以在20世纪40年代以来人们特别重视研究在扰动时电离层中所发生的过程和拟定预报扰动的方法。

有一种关于电离层扰动的新理论值需要得到重视，这种理论与经典理论不同，它认为电离层中扰动时发生的微扰的直接原因不是侵入电离层的微粒流，而是微粒流的电磁场，微粒流在运动中包围着地球绕其而过，如同流体绕过自己运动途中所遇到的障碍物一样。

用电离层测量的资料与太阳表面所发生的并引起太阳出现活动性现象的一切过程相比较，使预报电离层扰动的工作取得了重大的成就。

（4）电离层的分散现象。在电离层中散离E_s层和F_2层的形成问题与电离层扰动有着密切的联系。经过科学工作者多年的探索，发表了很多关于电离层中散离层形成的实验和理论工作的文章，并且已经得到了关于散离层形成的频繁程度、散离层构成的范围及其运动速度的补充资料，近二三十年还应用了火箭、人造地球卫星等现代技术作为工具进行深入的实验研究，但是对散离层构成的原因至今尚不完全清楚。大部分学者认为散离层的构成与微粒电离、流星电流有关，并且有人试图用电离空气团的涡流运动来解释散离E层的反射效应，根据这一论点，无线电波的反射是由于散离E层的不均匀性所引起的。

（5）电离层的非直线过程。早在1932年，M.A.邦奇·布鲁耶维奇就指出在电离层中有非直线性现象存在的可能性。此后不久就发现了所谓卢森堡-高尔基效应，即大功率的无线电广播台对其他中波电台的干扰作用，这一现象的基本理论是贝里和马丁两人在1934年建立的。

20世纪50年代以来关于电离层中非直线过程的问题，学者

们做了更完整更严格的研究，利用这些研究结果，不仅可以说明卢森堡-高尔基效应，而且也可以进一步研究电离层中其他非直线现象，例如：无线电波的吸收与波幅的关系，已调波传播时的失真等。

（6）无线电波在电离层中传播理论的发展。早期的无线电波在电离层中传播的理论是以设想电离层为电子气作为理论基础的。到20世纪50年代在这方面的研究已取得了相当大的进展，对所研究的现象也具有更明确的观点，把电离层看作是地磁场中的等离子区。地磁场的存在使等离子区具有各向异性媒质的特性，而各向异性媒质的特性是和电波传播的方向有关系的。

在进一步比较完善和严密的理论中，对一些过程的某些现象的分析还采用了微观的方法。在这一理论中，把电离现象、简单复合和复杂复合现象、电子附着于中性分子现象、在外部辐射的量子作用下电子脱离中性分子的现象、电子与中性分子、离子以及电子间的弹性碰撞和非弹性碰撞等现象都考虑在内。对某些问题还采用了量子力学方法。

对问题进行更普遍的研究证明：除了由于在等离子区中传播的波的作用而形成的带电质点本身的强迫振荡外，在等离子区中还发生本身所固有的纵向的所谓等离子区波，或叫做磁流体动力波（这种电波是瑞典天文学家阿尔文在研究宇宙电动力学的某些问题时首先引用的）。

电离层中等离子区波对无线电波在电离层中传播的过程究竟起什么作用尚难确定。可能是等离子区波引起了成为信号衰落原因的电离层运动，也许等离子区波能直接与主要横向无线电波相互作用。但是，毫无疑问，对电离层的过程的这种解释，即把电离层看作是处于恒定地磁场中的流体，并利用传导流体的流体力学的数学工具来研究电离层的过程，在很多方面都显示出良好的

效果。

电离层中无线电波传播的上述理论仅给最简单的无线电传播情况做出了完整的解答，尤其是对于铅垂方向的射波。但是对于无线电通信最有实际意义的无线电波的斜射传播问题，还没有得到严密的解答。

(7) 短波无线电通信线路的计算方法。由于获得了比较完整的关于大气电离层情况的资料，较深入地理解了电离层中无线电波的吸收和反射过程，对于建立短波无线电通信线路的计算方法就有了可靠的基础。A. H. 卡赞采夫所提出的计算方法使用起来又简单又方便，可用来计算无线电波在电离层的所有各层中（包括反射层在内）被吸收的情况，且在计算夜间电场时更为重要。

20 世纪 50 年代以后也提出过一系列关于短波通信线路的图解计算方法，使用起来更为方便。

(8) 米波在电离层中的散射。关于米波波段超出 1 000 千米的远距离接收的情况在 20 世纪 50 年代初就出现过，这个问题既不能用对流层的散射现象来解释，更不能用超折射现象来解释。后来学者们认为这种现象产生的原因是电离层的散射，这种散射在结构上类似于对流层的散射。只不过是电离层中的这些不均匀区的产生不仅是由于起伏过程的作用，而且还由于流星群的影响，除了可以观察到的“陨星”的巨大流星外，宇宙尘的微粒也经常不断地浸入电离层中，这些宇宙尘的微粒总合起来就能造成电离，从而导致电离层中出现显著的不均匀状态。

米波在电离层的散射传播的优点是每跳距离（或称一次反跳距离）大，可以利用它来建立远距离通信。但是，由于受限制太多，因而，只有当通信距离远达一二千千米，中间无法开设中继站（如中间是海洋），同时频带又允许较窄时，才利用电离层的散射方式。目前世界上电离层散射线路建立很少，就是因为这个原

因所致。

3.2 天线技术

实际上高频振荡的辐射和天线是同时出现的，所以，自从1887年赫兹在他的火花放电的实验中发现电磁波辐射的时候，就已经有了历史上的第一根天线。后来随着无线电通信、无线电广播和接收、电视广播和接收、雷达以及各个领域新的技术的发展，出现了各种类型的天线。

1. 早期的无线电报天线

1887年，赫兹在卡尔施吕黑的实验室中进行火花放电实验首次发现电磁波的时候，就使用过历史上的第一个天线。他的天线由两块40厘米见方的金属平板组成，每块板安装在一根30厘米长的杆上，两根杆放置在同一条直线上，它们靠近的一端各装一个用来产生放电的球。因为当时振荡的波长在一米左右，因而这两块简易的平板装置就是发射米波波段的无线电波天线，当然也就是历史上的第一个天线。

1894年波波夫在他的接收机上使用了天线，他把导线接到金属屑检波器的一头上，检波器的另一头接地，结果使接收距离大大增加，这就是一种开路的接地天线，也就是有意识使用的第一根天线。

1897年，马可尼在英国西海岸南段的布里斯托尔海湾进行跨海通信实验时，是在一根很高的杆子上架设了用金属圆筒制成的天线，接收天线也是架在高杆上的金属圆筒、接收机放在海湾里的佛勒霍姆小岛上，收发两地相距4.8千米，通信效果良好。一星期后他用两只覆盖着锡箔的风筝作收发天线，风筝升到49米的高度，接收机移到海湾对岸的布瑞当，收发距离增大到7.25千米，结果通信试验获得了巨大成功，无线电信号第一次传过了布里斯

托尔海湾。

1900年10月，马可尼在普尔杜建立了10千瓦的音响火花式电报发射机，这是当时世界上最大的发射机，同发射机相配合的天线很复杂。最初架设的是一种庞大的垂直天线阵，是用2 000根60米高的金属杆围成的一个大圆柱网，网的直径是45米，但由于太笨重而失败了。接着，他改变了方案，用很多根垂直天线排成扇形，在结构上加固。经过初次试验，通信距离达到322千米。接着，马可尼渡过大西洋，在纽芬兰的圣约翰斯的海岸建立了接收点，接收天线是线性天线，它很长，是用风筝送上天空的，距地面约120米。在1901年12月12日，收到了发射机的信号，越过大西洋的无线电通信获得了成功，通信距离达3 000多千米。

这段时期发展的天线主要是为了无线电报通信的需要，波长是在分米波和米波波段，不论其形式如何，基本上属于不对称的接地振子或者是从它发展而来的。但这时期的收发信号天线已各自与接收机和发射机分开，成为收发信号台设备中的独立部分。

2. 长波和中波天线

在1900～1910年期间，由于火花发射机的缺点很多，等幅振荡发射——电弧发射机和高频发电机式发射机逐步取代了它。这两种发射机一般频率都很低，主要是在长波波段工作。因此，在这段时间内，天线也从原来的分米波或米波波段过渡到长波波段。

长波天线工作波长范围可在2 000～20 000米内，由于长波传播主要是靠表面波，在表面波传播时，地的导电性起着重要作用，接收时受到的干扰主要来自大气放电。这种类型的天线主要用于无线电报通信，也用于无线电话。但由于在长波天线上得到宽通带是困难的，这就限制了通报速度（每分钟约100字）以及无线电话的使用效果。

这种类型的天线后来发展为许多种形式，其代表型有：伞形

天线、Γ形天线和T形天线等，在大功率电台内，天线架在8根或更多的支柱上做成复式的Γ形、T形或多边形天线，其支柱高为70～300米，采用多路接地，以降低地内损耗。

长波天线一般都具有方向性，如具有单根引下线的简单长波天线，其方向图定向因数为

$$F_{max} = \frac{2\pi h_e}{\lambda}$$

式中 h_e 为天线有效长度，λ 为波长。随着通信距离的要求，对天线的方向性也提出了要求，因而，对发射天线的方向性要求也越来越高，所以后来出现了许多定向天线。在接收天线方面，则由赫兹谐振器发展成为环状定向天线及其复式天线。

1920年，随着各国的无线电广播的开播，天线也相应地得到了发展，由于当时的无线电广播使用的波长是中波波段(180～550米)，因而相继地出现了一系列的中波天线。这些中波天线的类型有：

(1) 无顶负载的铅垂导线天线。

(2) 有顶负载的导线天线，例如Γ形、T形和伞形。

(3) 桅杆天线或铁塔天线。

(4) 拥有2～5根（或更多）桅杆的定向天线。

(5) 多边形天线和环形天线。

中波天线与长波天线的不同点在于：表面波与空间波同时传播。在白天，只有表面波；在夜间，则两种波都有。表面波射线与经由电离层E一次或多次反射的空间波射线互相产生干涉，结果引起接收点电动势的急剧变化，即所谓衰落现象。为了防止它，可以采用产生较弱空间波的天线即抗衰落天线。

原苏联在第二次世界大战期间建造了由四个高塔组成的天线系统，用于功率1 200千瓦的无线电广播，当四个塔全部同相馈电

时，天线是无方向的，定向发射时则只需给两个塔馈电，而另外两个塔用作无源反射器。

美国在20世纪30至40年代对中波定向广播天线使用得相当广泛，因为在美国许多无线广播电台只在一个州的范围内工作，因而要求这些电台在工作时，对有工作于相近波长的电台的各州中的接收干扰应降至最低限度，为了达到这个目的，一个天线系统中所用的竖塔型发射器要用到5个。

3. 短波广播天线

1921年，美国和欧洲相继发现波长比200米小的短波可以用作远距离广播，美国于1925年开始试验短波商用无线电通信，此后短波通信和短波广播陆续在世界各国发展，各种短波天线也跟着出现。就在1925年，原苏联的M.A. 邦奇·布鲁耶维奇和B.B. 达达林诺夫等创建了复杂的同相天线。其后不久欧洲也研究出类似的天线系，不久又出现了V型天线、谐波天线等，这些天线都属于驻波天线一类。1931年又出现了菱形天线(如图1.3-3)，这是一种行波天线，是V形天线的进一步发展，其优点是结构简单、架设容易、造价低廉，维护方便；用天线的架设高度可较容

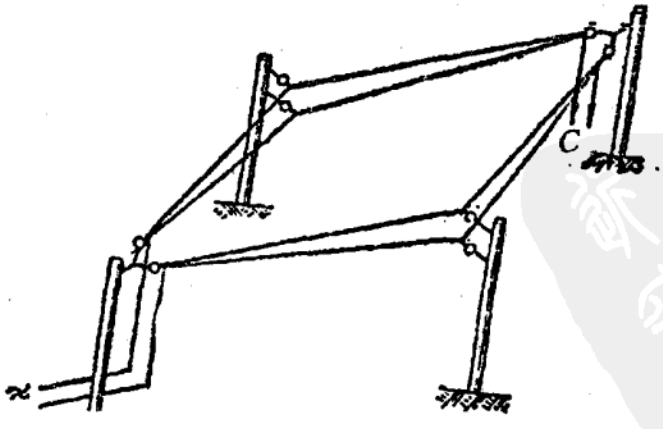


图1.3-3　菱形天线

易地控制射线仰角；又因为它结构对称，由改变终端负载的连接位置，即可达到双向工作的目的。由于它具有这些优点，所以短波无线电广播长时期都一直使用它，但它也具有它的缺点，如：占地面积大；终端负载上要吸收一部分功率，所以天线效率不高；另外，菱形天线方向图的副瓣较多且第一副瓣较大，所以天线信噪比较低，因而，经不断改进后便出现了双菱天线、双偏菱天线、复式双菱天线和重菱天线等。

4. 电视天线

1937 年，英国第一次播送了电视图象后，各国的电视广播也随着发展，1953 年，美国开始试播彩色电视，在这一期间，电视发射天线和接收天线都发展得很快。在发射天线上，各个国家的形式不全一样，但是所有的发射天线都围绕着两个基本目的：保证使优质电视节目所必需的宽频带通过而无失真；保证使伴音信号和图象信号同时发送。为了达到这一要求，一般使用产生水平极化场的天线，这种产生水平极化场的发射天线可分成下列三类：

（1）圆形天线。（2）井槽天线。（3）旋转场天线。

其中应用最广的是圆形天线与旋转场天线，圆形天线早在 1929 年就由 B. B 达达林诺夫所提出，故也称为达达林诺夫圆形天线。但目前用得最多的电视发射天线是蝙蝠翼天线（如图1. 3-4），这种天线的结构比较复杂，设计要求也比较严格，构造也很特殊，其目的都是为了展宽频带，使其能符合电视广播要求。为了使其在水平平面无方向性，照例应该采用两副蝙蝠翼天线正交配置，如果一副沿东、西向配置，另一副则要沿南、北向配置。两副蝙蝠翼天线应等幅相位差 90°馈电。为了增强垂直面的方向性、提高增益，采用了多层蝙蝠翼天线，由两层发展到四层、六层，还有采用八层的，其增益分贝数由二层的 3. 7 可以提高到八层的 9. 5。图 1. 3-5 所示的天线为两副双层蝙蝠翼天线。

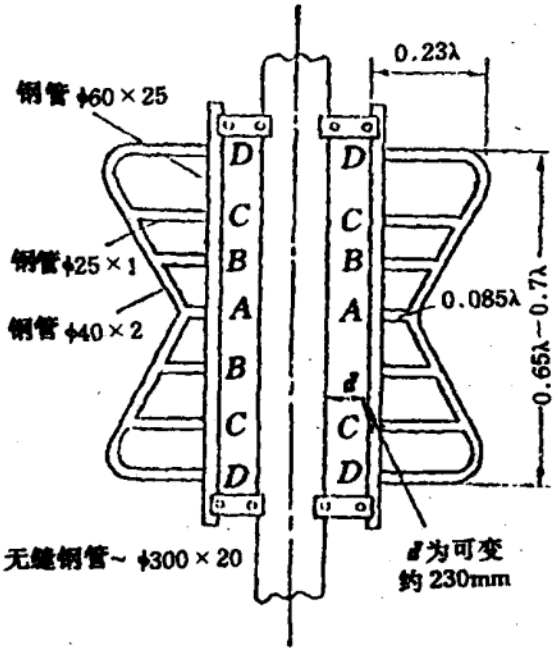


图 1.3-4　蝙蝠翼天线

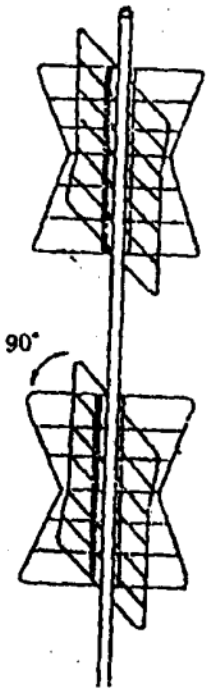


图 1.3-5　两副双层蝙蝠翼天线

电视接收天线一般都是对称振子或折合振子。1957 年，V. H. Rumsey提出了非频变天线的概念，所谓非频变天线就是指无限带宽的天线。对于目前的电视广播频道从 1 频道到 68 频道，频率范围从 48.5MHz 一直到 958MHz，无疑，非频变天线是最理想的，这种天线分为两种类型：双锥天线和等角螺旋天线，后来又出现一种对数周期天线如图 1.3-6，

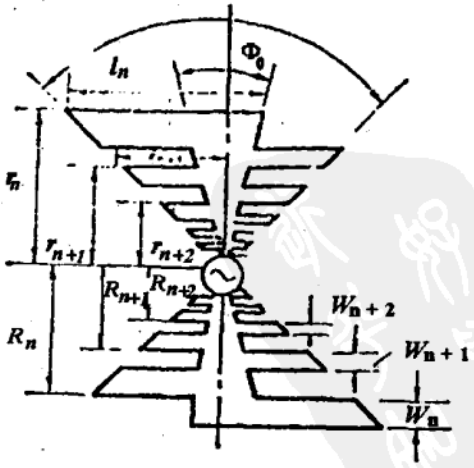


图 1.3-6　金属片型梯形齿对数周期天线

也属于非频变天线，它在短波、超短波和微波波段范围获得了广泛的应用。在短波波段，它被用作天波传播的通信天线；在超短波波段，它被用作电视集体接收（CATV）技术的较理想的接收天线；在微波波段，它常作为抛物面天线或透镜天线的初级辐射器以及在相控阵天线中作辐射单元等。

作为电视接收天线，通常见到的还有两种：一种是八木天线如图 1.3-7，它为日本八木在 1926 年所发明，这是一种定向天线，方向性比较强，开始时作为短波和超短波定向通信用，电视广播开展以后，很快被用作电视室外接收天线；另一种是螺旋天线，它的特点是宽频带，根据结构不同具有不同的方向性。它的类型有圆柱形螺旋天线和圆锥形螺旋天线两种如图 1.3-8，可适用于电视接收，也可作定向通信的发射天线用。

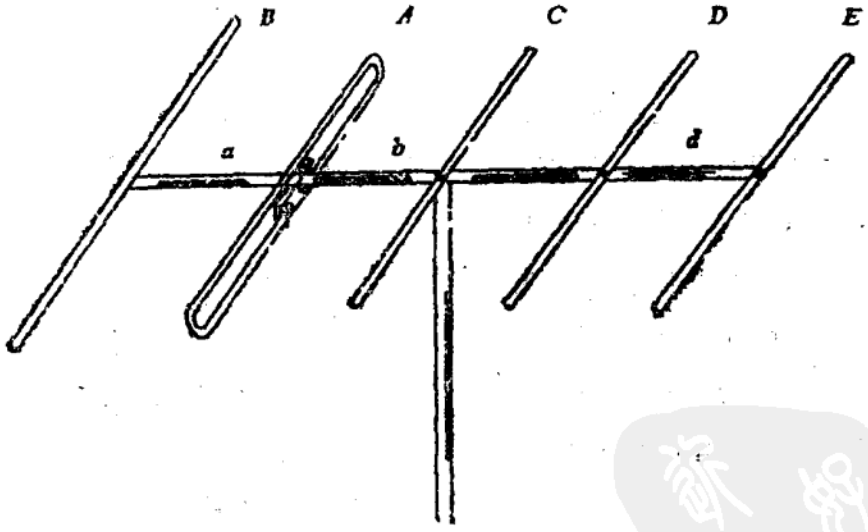


图 1.3-7 八木天线

5. 微波和雷达天线

1930 年以后，各国对雷达技术的研究和发展给予了高度的重视，雷达天线技术也得到了相应的发展，从早期轻便雷达所使用

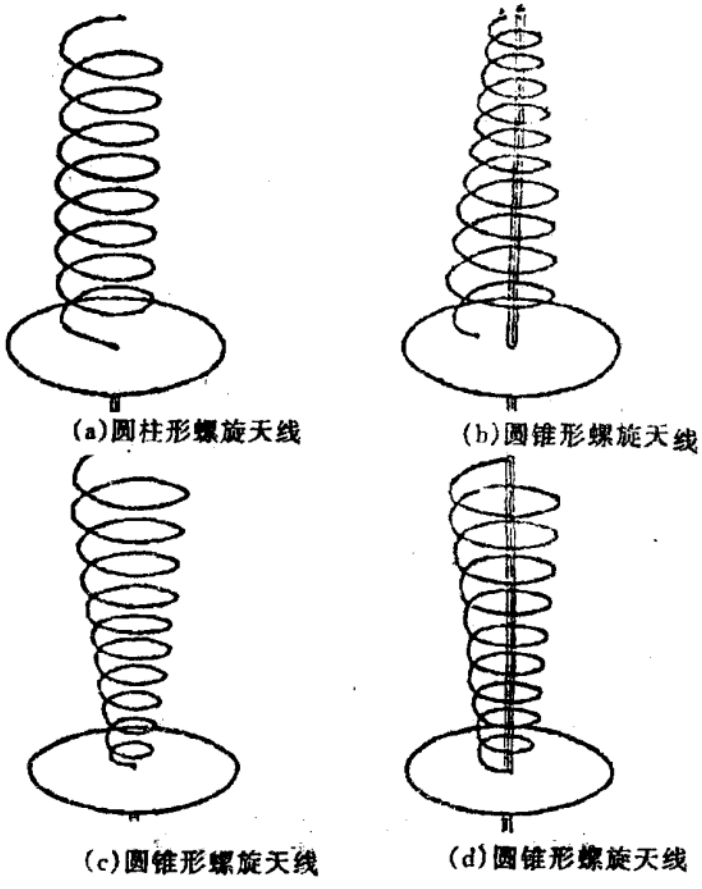


图 1.3-8　螺旋天线

的八木天线和八木天线阵到各种用途、各个领域使用的各类型线天线和面天线。到目前为止，雷达中使用最多的天线是面天线，如尺寸最大的远程警戒雷达天线，按照这种雷达任务的要求，其天线应当具有很大的增益（约几千），并应当按使用大功率（1 兆瓦或更大的脉冲）来设计。这种天线必须能够环扫四周空间，具有自动测定和显示飞行物高度和位置的能力。有的配备有火炮自动跟踪和指挥系统，还能发出指令发射火箭或火炮对敌方飞行物予以截击；射电望远镜也是一种面天线，它具有尖锐的方向性和比较宽的频带，应用的波段由 8 毫米至 15 米，用于射电天文学中。

用于微波和雷达的面天线的类型一般可分为：

（1）旋转抛物面天线。（2）卡塞格伦双反射面天线。（3）扇形波束天线。（4）金属透镜天线。

扇形波束天线在两个相互垂直的平面内方向图的波瓣一个宽而另一个窄。如天线波束在水平面内很窄，而在垂直面很宽；或者波束在垂直面内很窄，在水平面内很宽。这样的波束扫描比波瓣很窄的天线扫描容易发现目标。这类天线有切割抛物面天线、抛物柱面天线、余割波束天线和喇叭——抛物面天线等几种形式。

金属透镜天线于 1944 年被研制成功并开始使用。1946 年还研制出一种折射系数大于 1 的金属透镜，实用上以球面形的平凸透镜为主。透镜天线的优点是：

①它所要求的制造精确度低于抛物面天线；②加于发射体的反射作用较小；③频率的特性较好。

此外，还有喇叭天线及后来发展的裂缝天线和微带天线等。

第四章 微波通信与雷达

4.1 微波通信

1. 微波技术及主要用途

微波是指波长从 1 米到 1 毫米波段的无线电波，属电磁波的一部分，在无线电波中，它是属于波长最短、频率最高的波段，有的国家称它为超短波，也称它为超高频无线电波。它也可划分为米波、分米波、厘米波和毫米波。它的用途非常重要也极为广泛，可用于多路通信、电视传输、卫星通信、导航、雷达、遥感、遥测、射电天文、无线电气象、工业、农业、医学和地质探矿等许多方面。在第二次世界大战以来，微波技术发展极为迅速，其用

途已深入到各个领域。

2. 微波通信发展过程

早期的无线电报所用的火花式发报机所产生的无线电波，其频率就处于微波波段，所以也可以说，早期的无线电报也属于微波通信，而正式的微波通信是从 20 世纪 30 年代开始的。

1920 年，巴克豪森的正栅振荡器为人们提供了一种高效率产生 40 厘米波的手段，这件工作使通信工作的学者们感到极大兴趣并给予高度重视。1929 年，与巴黎远程通信实验中心有联系的 A.G. 克拉维开始了一项实验计划，对当时公认的原则（即有线电报或电缆电报无论什么时候只要物理上是可能的，就应当比无线电报优先使用的原则）提出了挑战。

1930 年，一条通信线路在新泽西的两个终端之间用 10 英尺抛物面天线开始工作。实验刚刚开始，工程就迁回了法国。1931 年 3 月 31 日，实际工作有力地证明了微波传输的优点。在加来和多佛之间的 40 多千米路程的通信中，微波传输提供了一种经济、质量好、可靠性高和灵活性大的新方式。线路提供电话和电传打字服务，使用的是以 4°波束用 3 米直径的抛物反射面发射的 17.6 厘米的微波，功率输出为几分之一瓦。A.G. 克拉维接着于 1933 年建立由英国的莱普尼到法国圣-因格列维特的第一条商业微波无线电通信线路。

微波通信能否得到发展在当时必须解决几个大问题：第一个是传输设备问题，当时是利用了空间传播，用天线发射和天线接收，但是没有中继站，通信距离受到限制；第二个是微波源问题，火花隙发射机只能发射衰减信号不能产生等幅振荡，在通信上大受限制，所以在当时必须解决等幅振荡的大功率微波源；第三个是微波放大问题，作为微波通信的中继站和接收站，都必须将微波加以放大；第四个是各种功能的微波通信配套的元器件研制问

题。

1934～1936 年，微波传输线——波导得到了解决。1934 年，索思沃斯就在一个直径 5 英寸、长为 875 英尺的中空金属管中传播了波长为 15 厘米的电报和电话信号，其衰减相当小。卡森·梅德和斯切尔康诺夫于 1936 年在贝尔电话实验室发表了他们关于超高频波导的数学理论，而索思沃斯则发表了他的实验结果，这些论文为 TE_{01}型圆形波导提供了基础，在同一年，麻省理工学院的巴娄(W. L. Barrow)发表了关于电磁波在中空的金属管中传播的著作，从而解决了除空间直接传播以外的传输方法问题。

接着在 1938 年，布拉蚩（Bruche）和赖克纳止尔(Recknagel）讨论了“相聚焦”，而布鲁斯、韦伯特的工作则从理论上解决了速调管的问题。在 1939 年，美国的 W. C. 哈恩(W. C. Hahn)、V. 布鲁斯（Varian Bros）发明了速调管。这就为等幅振荡提供了微波源。但是速调管产生的功率远远不能满足微波发射机的要求，英国的兰德尔（J. T. Randall）和布特(H. A. Boot）将谐振腔的原理用到磁控管上去，这种磁控管是美国通用电气公司的豪尔（A. W. Hull）于 1921 年发明的，但是在他们当时的那种常规形式的磁控管中，没有获得他们所追求的特性，将谐振腔的概念用于磁控管的结果，出现了空腔磁控管，这是一种厘米波大功率发生器，它能满足微波发射机的要求。

1943 年，美国的 R. 康普涅尔（R. Kompfner）指出，在一个慢波结构（特别是一个螺旋管）上的电磁波，如果波速与一个电子束中的电子速度非常接近的话，电磁波与电子束将发生强烈的相互作用，他制作了一个管子，当电磁波沿着电子运动方向进行时，获得了大约 10 分贝的增益，数学分析与此特性相符。这就是能将微波进行放大的行波管。行波管还是一种非常优良的宽带放大器，它能在非常宽的频带和功率范围内工作，一个带有螺旋管

电路的行波管，能放大的频率范围，超过一个倍频程。当时一个典型的例子是：利用输入和输出耦合，带宽的限度是500～1 000兆赫。

在这一期间，微波谐振腔、微波天线及其他一些微波波导元件也相继发明，微波谐振腔相当于低频电路中的振荡电路，微波天线作为辐射器，加上前面介绍过的微波大功率磁控管、放大用的行波管和传输用的波导管，因而具备了微波中继通信和微波波导通信两种形式的物质基础和技术基础。

3. 现代微波通信概况

第二次世界大战期间，微波主要被应用在雷达上，且主要是厘米波段。战后，在多路通信上，微波传输有很大的发展，到20世纪80年代，微波多路通信已发展到具有几千路电话和几十路电视的容量，而微波通信的另一个领域——卫星通信也迅速地发展。1957年，在原苏联发射第一颗人造卫星成功后，科学家们开始考虑卫星通信，使用的无线电波自然是微波，因为只有微波才能穿过电离层。1960年，美国发射了一颗“回声”卫星，这是一颗无源通信卫星，依靠它的表面金属层将微波反射，实现了横跨大西洋的转播。1962年美国发射成功一颗有源通信卫星，正式利用它转播电视、电话、数据和传真。自此以后，卫星通信不断迅速发展，所使用的工作频率也不断提高，因而通信容量也越来越大。如1965年正式开始国际卫星通信时，容量为240路电话，到1975年，已增加到6 000路电话和两套电视节目。进入20世纪80年代，新一代“国际卫星通信5号”的通信容量已达到12 000双向话路和2路彩色电视的容量。所用的微波波段已从厘米波段推向毫米波段及亚毫米波段，这样，通信的容量更大了。

4.2 雷达

1. 早期的雷达

微波的另一个主要用途就是雷达。

早在1897年的初夏，波波夫在巡洋舰“阿非利加”号和教练舰“欧罗巴”号上进行无线电通信试验时就发现，电磁波被在两舰中间驶过的第三艘军舰所反射。1900年，台思拉阐述了无线电反射的作用，尽管当时根本还没考虑到有关雷达的问题，但实际上已是雷达原理了。1922年9月，美国海军的两个实验员泰勒（A. HoytTaylor）和杨格（Leo C. Young）在华盛顿附近的波特麦克河两岸从事短波无线电通信的试验，他们发现当船只穿过接收机和发射机中间时，便使通信产生明显影响，甚至会切断他们之间的通信联系，这便是有名的波特麦克实验。这再一次证实了无线电波的反射并且向人们显示了这种反射特性有极大的利用价值。在同一年，马可尼提出了一种具有实用价值的雷达系统。

1931年，美国海军研究所制定了一项《用无线电检测敌人舰船和飞机》的计划。初期试验的雷达应用连续波，它利用发射机发出的直接信号与活动目标的反射信号之间的干涉现象进行检测，称做连续波干涉雷达，探测距离40英里（64千米）。这种雷达可用来确定目标方位，也可测定其距离。当时在各个国家里都出现过与此类似的连续波雷达，其原理都是利用相位关系来确定目标的位置，也有人称它为相位连续波雷达，这种连续波雷达在二战期间得到了广泛的应用，随后发展成几十种不同用途的雷达，工作波段从超短波直到千余米的长波。

在当时（20世纪30年代初），由于这种雷达不适于在船上使用，海军失去了继续研究的兴趣。而后，杨格向泰勒建议使用脉冲技术。1934年开始研究脉冲雷达，1936年获得成功，探测飞机

距离达到 25 英里（40 千米）。1937 年这部雷达被安装到第一次世界大战期间的驱逐舰 USS“李厄里”号上试用，虽然作用距离只有 10～12 英里（16～19 千米），但实验是成功的。以后在这一基础上研制改进而成的 CXAM 雷达共装备了 19 艘军舰。这在当时只有美国海军具有雷达装备。

2. 二战推动了雷达加速发展

在这期间，欧洲各个国家都认识到了雷达对军事应用的意义，纷纷投入研究。英国由于所处地位易受空中攻击，因此投入了相当大的力量，发展最快。1935 年，英国皇家物理研究所无线电部部长沃森·瓦特（Watson Watt 后更名为罗伯特），坚信无线电波可用以探测飞机，在他初步试验成功的提议下，开始了大规模的研究，当年研制成了波长 1.5 米的雷达。这是一部探测飞机用的雷达，三年以后的 1938 年英国在东海岸建成了对空雷达网。

德国纳粹分子发动了第二次世界大战，攻陷了与英国隔海相望的法国敦刻尔克，但是，英国凭借其建立的雷达网，牢牢地掌握着制空权，有效地防止了德国的空袭，断绝了它登陆英国的想法，挽救了英国。据说英国为雷达研究计划，投资达 5 亿英镑之巨，足以与美国研制首批三颗原子弹的曼哈顿计划相匹敌。

1939 年，英国、德国、荷兰、美国都有了军用雷达设备，并居于技术领先地位。但是，首先将雷达作和平应用的则是法国。法国和德国从事雷达研究工作的是无线电公司的科学家们，在英国和美国则是政府研究机构中的科学家。法国无线电公司于 1934 年开始研究运用无线电米波和分米波探测航行中的障碍，他们的首要目的是保证海上的生命安全。第二年，使用磁控管和脉冲电波原理的分米波“障碍探测器”（雷达）便安装在大型客轮“诺曼底”号上。在军事上。法国于 1936 年就在北部哈佛尔港建立了雷达设备，监控港口船只的进出。同时，对飞机探测雷达也进行了

研究，但一直到1939年才有雷达警报系统。

德国在1935年前开始了雷达的研制工作，1939年也有了许多雷达用于探测飞机。尽管德国在这项研究上开始得并不算晚，而且水平同样很先进，但因为它执行的是对外侵略政策，战争爆发后一直寄幻想于速决战，忽视了对雷达的研究工作，终于落在美、英两国的后面，其他国家如日本、意大利、原苏联等国，开始研制雷达的时间又稍晚一些。

美国经泰勒建议，采用连续波雷达探测敌机的方案是由陆军完成的，但是这种雷达并未付诸实用就转而从事脉冲雷达的研制。1936年研制成SCR—268防空火控雷达，稍晚于英国。由于雷达角度精确度不够高，故夜间作业必须与探照灯组合进行火控。1939年，美国陆军又研制成远距离警戒雷达SCR-270。日本偷袭珍珠港，装备在夏威夷的一部SCR—270雷达有所察觉，可惜未能引起有关方面注意，从而遭受了惨重的损失。SCR—270还曾立过光荣的战功，一次有80架飞机侵袭澳大利亚基地，在离基地240千米的天空就被雷达发现。

1940年后，美、英在研制雷达方面进行合作，为适应高频大功率发射机的需求，使用了兰德尔和布特发明的空腔磁控管，这使得微波雷达的进展加快了速度。

1940年9月，英国以亨利·泰萨德为团长的英国使团，在一只小箱里装了秘密的空腔磁控管西渡美国，在贝尔研究所做了试验，获得了3千兆赫频率、10千瓦的脉冲峰值功率，比以前最好的三极管功率大5倍，频率高4倍，在此基础上逐渐开发出了飞机上用的机载雷达。1940年11月，美国麻省理工学院的辐射实验室承担了微波雷达的研究工作，一批物理学家对推进雷达的发展做出了重大的贡献。

1941年以后，美国先后研制成了陆军用AI雷达，海军用

SCR-520、SCR-720 雷达、对空火控 SCR-584 雷达等。美国的雷达在中途岛战役、马里亚纳海战中发挥了巨大的作用，是美国取得战役胜利的重要保证。

第二次世界大战时期被称为电子工业的雷达时代，雷达成了电子工业的代表性产品。电子管的革新、阴极射线管的改进，推动了雷达的发展，而雷达的进步，又为战后电视的发展、电子计算机的兴起打下了牢固的基础。第二次世界大战又被称为“电波的战争”，在这期间电子工业也获得了巨大的发展。

军用雷达在第二次世界大战刚结束后的一段时间内并没有多大发展，如 SCR-584 远程警戒雷达，在北大西洋公约组织国家一直使用到 1955 年。那时，远程轰炸机、导弹、核武器等都已存在，一个国家可以突然袭击另一个国家，很可能在顷刻之间使之遭受巨大的损失。因此美国认为，必须开发新的远程雷达系统以保证有足够的预警时间。

3. 现代雷达

20 世纪 50 年代中期，由于电子计算机的出现，使雷达和武器系统进一步密切结合，美国国防部建立的“赛其”防空系统，是针对来自北极方面空袭的著名防空系统，在这一系统中，雷达和中央计算机相连接，计算机的作用之一就是利用它的存储器。“记住”飞行计划中的民用飞机，因而能够识别它们，而对于不明的飞机则可引导歼击机和导弹等进行拦截。

随着飞机的速度越来越快，原有雷达对攻击的反应时间就变得越来越少而不能适应要求。因此，20 世纪 50 年代出现了远程预警雷达系统，它可以探测到高速飞机，不过对导弹还无能为力。1959 年，美国在格陵兰岛建立了第一部导弹早期预警雷达系统，它具有 4 座高 165 英尺（55 米）的天线，可以探测到3 000英里（4 800 千米）以外的导弹，给出 20 分钟的预警时间。

进入20世纪70年代以后，雷达发射功率及探测距离，都向着两极发展，峰值功率从几十瓦到几十兆瓦，作用距离从不及一千米到几万千米不等。美国单脉冲跟踪雷达，对飞行器跟踪距离可达几十万千米以上，超视距雷达对洲际导弹的探测距离可达8 000千米，相控阵雷达对卫星的作用距离为25 000千米。有的雷达装置体积硕大无比，犹如高楼大厦，有的雷达则小巧玲珑，可以肩负手持。

美国是世界上生产和装备雷达最多的国家，据不完全统计，20世纪80年代初已拥有雷达744种，其中地面雷达304种，舰载雷达92种，机载雷达348种。军用雷达的年产值约为12～14亿美元。原苏联也极重视雷达，在发展雷达的投资上已超过美国。到80年代末，世界上主要使用和研制的各种型号雷达已有1 500多种。

现代战场上的雷达所面临的问题是：

(1) 电子战的威胁

在雷达领域中的电子战包括对雷达的侦察、干扰与雷达的反侦察、反干扰两个方面的相互斗争。在现代战争中，由于防御系统的不断增强，采用火力手段直接摧毁雷达是有一定困难的，而利用电子侦察、电子干扰等对抗措施，则可以在很远的距离之外，并在广阔的范围内干扰破坏雷达系统的正常工作。

对雷达实施电子侦察，可以查明敌方雷达与武器系统等电子设备的工作性能、技术参数、类型、数量、位置、作战布署与军事行动企图等重要情报。

对雷达实施电子干扰的手段，可分为压制性干扰和欺骗性干扰两大类。在众多的干扰方式中，雷达最难对付的是频谱接近于白噪声的有源干扰，因为它既不能用干扰抑制滤波器和恒虚警电路去抗干扰，也不能用时间选择的方法去消除。

（2）如何对付反辐射导弹

因为雷达是靠发射强大的电磁波来进行工作的，而反辐射导弹则能对雷达波束进行跟踪并摧毁雷达。20世纪60年代，美国研制成功第一代反辐射导弹“百舌鸟”，对摧毁圆锥扫描的火控雷达极为有效。1986年4月，美国在对利比亚发动的“草原之火”和“黄金峡谷”两次军事行动中，首次使用了第三代反辐射导弹“哈姆”型导弹。

近年来，反辐射导弹的技术有了很大的进展，一是扩大了频率覆盖范围，美国第一代“百舌鸟”导弹要用13种导引头才能覆盖L至K波段；第二代“标准”导弹减为两种；第三代“哈姆”导弹则只需一种；二是提高了导引头的灵敏度，它不仅能截获目标雷达天线的主波瓣，也能截获其副波瓣及背波瓣，这样，反辐射导弹既能攻击火控雷达，又能攻击警戒雷达等；三是采用了微机控制，对导引头进行预先编程，使反辐射导弹具有自主搜索和截获攻击目标的能力；四是加装了惯性基准装置（如“哈姆”导弹）或记忆装置（如“标准”导弹），当反辐射导弹跟踪目标信号飞行一段时间后，即使丢失信号，仍能用这些装置使其飞向目标。

（3）怎样识破飞行目标的隐身技术

隐身技术是指在飞机、导弹、坦克、舰艇的表面涂上一种能吸收无线电波的材料，使雷达变成“瞎子”、“聋子”，达到隐蔽自己的目的。隐身技术与电子侦察和干扰相似，是使雷达迷盲的“软”对抗技术。隐身技术被称为“继喷气发动机和后掠翼之后，最具有革命性的军事航空技术”，被美国军界列为第二重大研究技术。

美国、原苏联等国在20世纪50年代就已开始研究隐身技术。60年代，美国在U-2侦察机上已采用吸收涂层技术。80年代初，隐身技术有了突破性的进展，出现了编入装备的B-1B隐身轰炸

机、隐身巡航导弹和隐身微型无人驾驶飞机。80年代后期，美国使用的B-1B轰炸机对雷达的反射面积，已降到1米^2，这给远距离探测B-1B轰炸机带来了许多困难。

隐身技术可分为外形技术、吸波涂层技术和阻抗加载技术等三种类型。

综上所述，现代雷达必须提高克服上述三种反雷达技术的能力。为此，现代雷达在技术上采取了下列措施：加强抑制杂波的能力、采用复杂的信号波形和采用反干扰技术。同时，现代雷达在现有功能的基础上，研制出或正在研制多种新的雷达体制和技术。其中包括：毫米波雷达、星载雷达、航天机载雷达、天基雷达、噪声雷达、低截获概率雷达、双(多)基地雷达和无源雷达等。

第五章 电视与电视广播

5.1 机械式电视

从电视的发展过程来看，可分如下四个阶段：(1) 机械式电视；(2) 黑白电视；(3) 彩色电视；(4) 新型现代电视。

当有线电报发明以后不久，就有人在思索怎样利用电线来传输图象。首先想到的自然是静止图象的传送。英国苏格兰的一位钟表匠、电钟的发明者贝恩 (Alexander Bain) 于1842年提出了用电来传输图象和文字的设想，并做了传真的实验，他采用了“自动电化学记录电极”的方法，并获得了该项的专利。其后，F.贝克伟尔(Frederick Backwell)制成了圆筒和螺旋式传真装置。意大利的凯塞利 (Abbe Giovanni Caselli) 用了10年时间，在1862年研制成了简单的传真设备，将照片变成电信号通过电线传输。后来，他在法国建立了若干传真站，站与站之间可以传送发信人的

手迹。但由于传输速度很慢，没有太大实用价值，只在短时间内使用过。

实际上，在很长的一段时间里，就已经有人考虑到要将一幅图象传送到远处的接收屏上，必须把整幅图象划分成尽可能多的小部分，这就是后来电视中的像素概念。只有这样做之后，才能将从每个这种部分反射出来的光线变成一定大小的电流，或者说变成电信号，这些信号传送到远方接收屏上同样位置的单独像素上，在这儿变成一定亮度的光点。再由于眼睛的性能——在一定距离里能把许多单独的像素汇成一个整体，就得了一幅十分完整的图象。这种设想就确立了电视机最重要的原理。

1873 年，贝尔的助手史密斯（W. Smith）在把硒作为电阻进行实验时，发现由于窗户太阳光的照射而使硒有电阻的变化，这就是硒的光电效应。一位名叫克里的发明家利用硒的光电效应以及“像素”的概念设计了最简单的电视装置，在他的装置中有两个大屏：一个是发送屏，另一个是接收屏。

发送屏是由许多单独的硒光电管像蜂巢似地装配成的，这个屏面就是眼睛的视网膜，不过代替千百万个敏感的视神经的锥状体和杆状体的，只是几百个硒光电管；接收屏由同样多的白炽灯装成，电灯的排列方式同发送屏上的光电管一样，每个光电管用导线和装在接收屏上的相应的电灯以及电池组串联成一个闭合电路，电流就可以在这里面流过。然后利用照相镜头把要发的像投影到发送屏上，如图 1.5-1 所示。

一部分光电管受到从像的最亮部分射来的光，在光的作用下，硒片上的电阻减小而从电池组流经这些硒片的电流也就增加了。这样在接收屏上相应部位的电灯就发出了明亮的光；受到从像上最暗部分射来的光的那些光电管，并不怎么显著地改变电阻，因此流过它们的电流也不增大，同它们连接着的电灯也仍然是暗的。

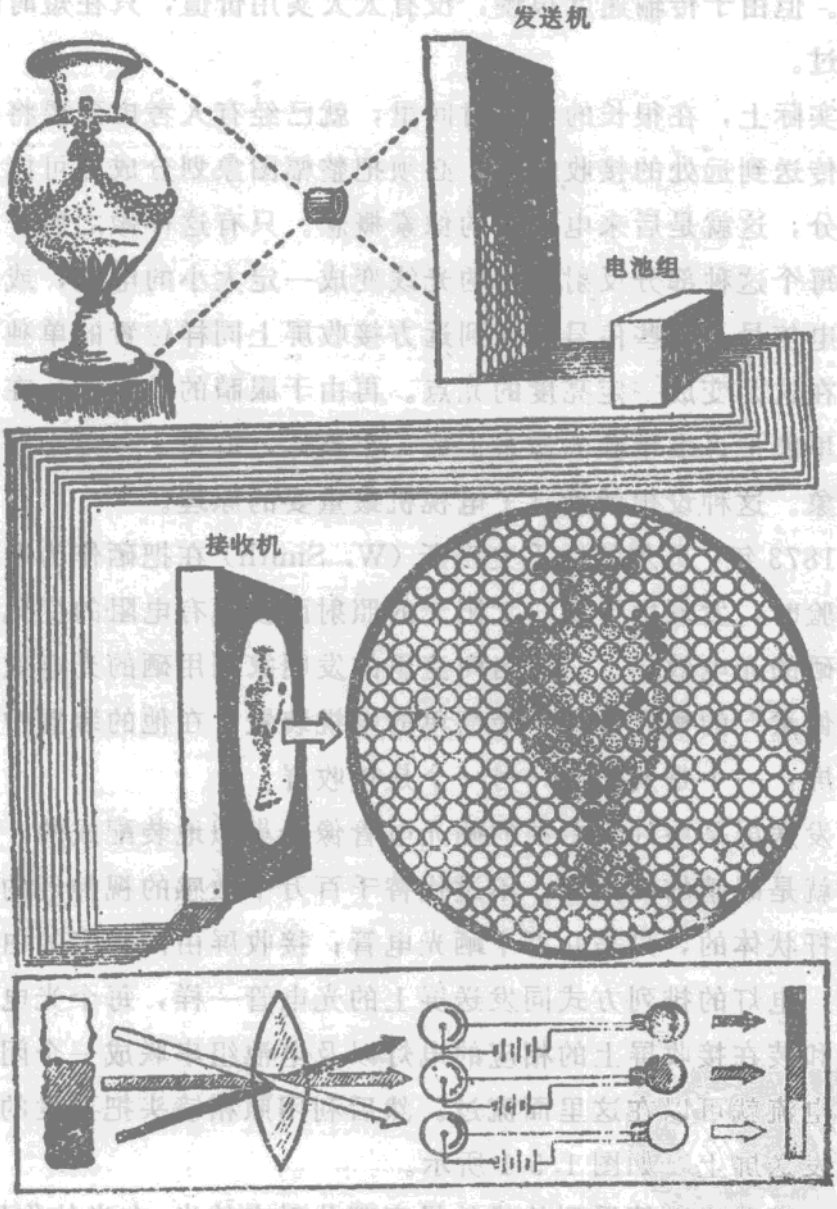


图 1.5-1 第一套远距离传像装置的设计图

这样，发射屏上不同亮度的各部分都出现在接收屏上的相应部位，这样就使图象得到了传输，当传输的图象有变化时，或者说图象是运动的物体，那么在接收屏上也会出现相应变化的图象，这样

就进行了运动图象的传输。

但是，当时的这种设计只能是纸上谈兵，而不能付诸实施，因为光电管的电流太弱，不能点亮那时候的电灯，而放大这些极小的电流的工具还没有发明。

1884 年，德国的铁道工程师尼普科夫（Paul Nipkow）首次实现了电视的机械扫描，他发明了一种机械扫描盘（这就是电视史上著名的尼普科夫圆盘，如图 1.5-2），这个圆盘的边上开着孔，这些小孔沿着盘边排成螺旋线形，相邻两孔间的距离等于被扫描的图象的宽度，而螺旋线的开头和末尾间距离就是图象的高度，当圆盘转动时，从第一个孔到第二个孔，就扫完图象的第一行，而从第二个孔到第三个孔，就扫完第二行……一直到最后的一个孔扫完，就完成了整幅图象的扫描（如图 1.5-3）。从小孔透过的光线经过物镜投映在光电管的感光面上，这样就将一幅图象的各个像素变成了与它亮度相应的变化电流而传输到接收装置上。在这里的接收装置主要是一个特殊的灯泡和一个同样的尼普科夫圆盘。

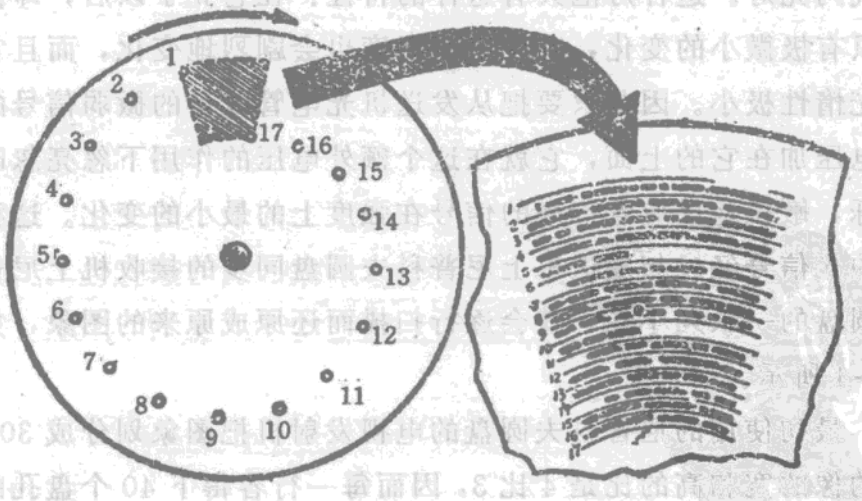


图 1.5-2　尼普科夫盘

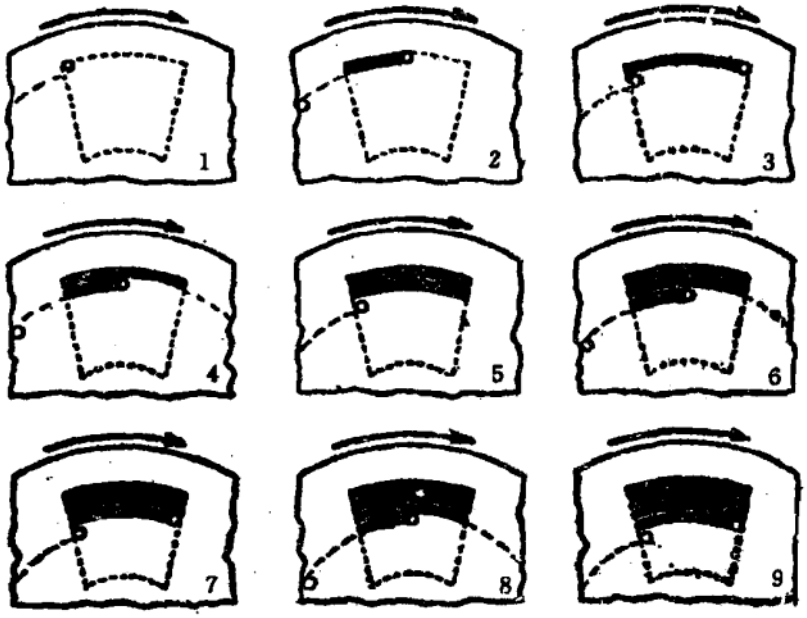


图 1.5-3 尼普科夫盘上的各个孔扫描图象的次序

这里的灯泡只是一个灯泡而不是前面说的一大群灯泡，但是这个灯泡构造是特殊的，和普通的白炽灯泡大不相同，它是所谓充气闪光灯。这种灯泡具有这样的特性：在它亮了以后，即使电压只有极微小的变化，它发光的亮度也会剧烈地变化，而且它的发光惰性极小。因此只要把从发送机光电管收得的微弱信号的脉动电压加在它的上面，它就在这个额外电压的作用下忽亮忽暗地闪烁，敏锐地反应着传来的信号在强度上的最小的变化。这种变化的光信号经过与发送机上尼普科夫圆盘同步的接收机上尼普科夫圆盘的一系列小孔，就会逐行扫描而还原成原来的图象，如图 1.5-4 所示。

最初使用的尼普科夫圆盘的电视发射机把图象划分成 30 行，它的像的宽和高的比是 4 比 3，因而每一行容得下 40 个盘孔的直径，也就是每行有 40 个像素，这样，整幅像可分成了 30×40=1 200 个像素，后来，逐步改进，圆盘上的小孔逐步增加，由 60、80

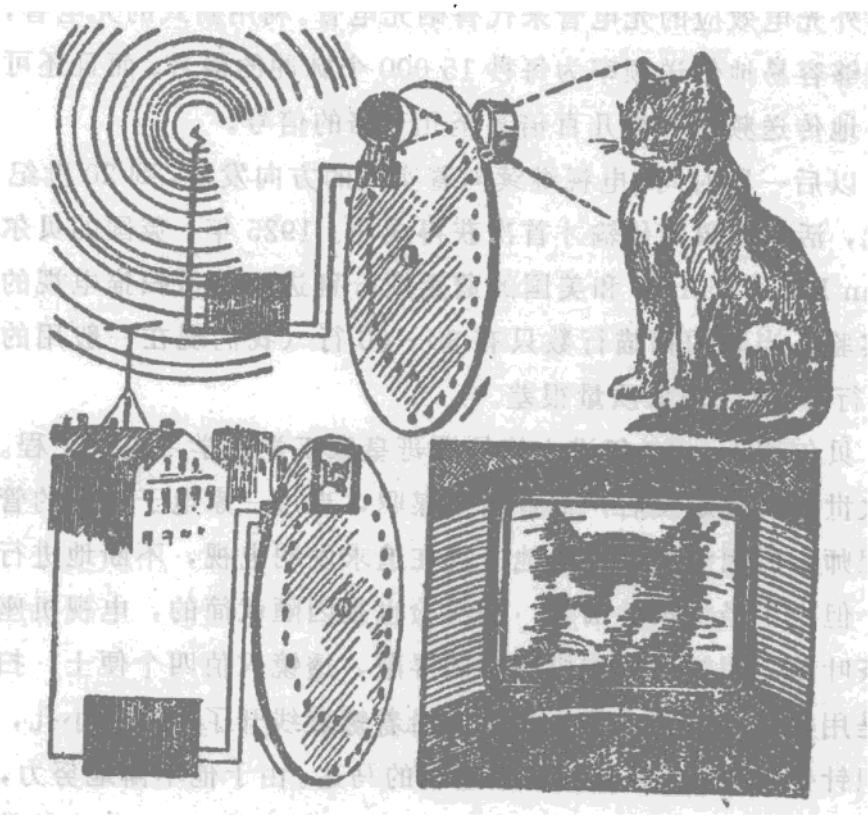


图 1.5-4　利用尼普科夫盘传像的装置的简图

最后增至 120，也就是把像分成 120 行，这样被传送的像素就变成了 120×160＝19 200 个。

尼普科夫的这一发明获得了专利，但没有做出实际装置。而且得到的仅是一幅幅断续的静止图象。这是由于硒的电阻变化存在惰性，跟不上快速信号的变化的缘故。

1888 年，俄国的斯托列托夫发现了外光电效应，根据这种效应研制出了新的光电管，这种新式的光电管具有这样的特性，不论射在它上面的光束变化多快，光束引起的电流也能准确地追踪着光度的任何最细微的变化，它完全克服了硒光电管所具有的惰性，为电视的进一步发展开辟了道路。在发送机方面可以装置新

式的外光电效应的光电管来代替硒光电管。利用新式的光电管，不仅能够容易地传送频率为每秒 15 000 个脉冲的信号，而且还可以容易地传送频率再高几百倍甚至几千倍的信号。

以后一段时间，电视继续向着实用的方向发展，到 20 世纪 20 年代，活动图象的传输才首次获得成功。1925 年，英国的贝尔德（John Logie Baird）和美国的詹金斯分别进行机械扫描电视的公开实验，当时的扫描行数只有 30～60 行（我们现在一般用的是 625 行），所以图象质量很差。

贝尔德于 1906 年进入格拉斯哥皇家工学院学习电气工程。第一次世界大战爆发后，他曾四处谋职，当过一家电子公司的管理工程师，后因病失业。但他一直在追求发明电视，不断地进行实验。但由于经济条件困难，搞实验也是因陋就简的，电视机座是个茶叶箱，用饼干盒作投影灯的屏蔽，透镜只值四个便士，扫描盘是用帽子盒盖剪成的，在盘上沿着螺旋线开了一系列小孔，用编织针作轴，动力则是一个旧电扇的马达。由于他不懈地努力，经过不断的改进，1925 年 10 月 2 日，他的装置成功了。住在他楼下的一个叫威廉·戴恩顿的公务员分享了他的幸福，成了历史上第一个上电视的人。

1929 年，经贝尔德的劝说，英国广播公司开始试播电视。尽管使用的是“西洋镜”屏幕，高仅 1 英寸（2.54 厘米），宽仅 0.5 英寸，而且图象闪烁不定，时隐时现。并且要等到午夜英国广播电台停播以后，才用一般广播频率传送视频信号，一个星期播送 5 次，每次 30 分钟。可还是有不少人为了新奇而观看这样的电视，人们争相购买贝尔德供应的电视接收装置。

贝尔德为电视奋斗了一生，贫穷、战争都没有动摇他献身于电视事业的理想。他对他的机械式电视一次又一次地做了改进和革新，甚至用他的电视系统表演了彩色电视、立体电视、投影电

视、闭路电视和电视录相等等。使他的祖国——英国在电视领域里一度处于领先的地位。电视方面有许多的世界第一属于贝尔德。虽然他的电视系统都是机械式的，最终都一一被更先进的电子式系统所淘汰。但他的一生业绩，确为电视事业建立了坚实的基础。可以这样说，没有贝尔德的贡献，电子电视时代也许要等待更多的时间才能到来。

5.2　电子电视

为了传输清晰的图象，需要进行快速扫描，这一点机械扫描是办不到的，因此人们转向了电子扫描的研究。全电子电视装置的一个关键器件是德国物理学家布朗（Ferdinand Braun）发明的阴极射线管。1897 年，F. 布朗在斯特拉斯堡大学装配成第一台阴极射线示波器。

“布朗管”与早期的 X 射线管很类似，把气体放电现象用于发射和形成电子束。当时就有人提出过将尼普科夫圆盘和“布朗管”结合的建议，也有人进一步提出了全电子电视的设想。俄罗斯圣彼得堡工学院的鲍里斯·罗申（Boris Rosins）教授就是想利用布朗管接收图象的第一个物理学家，早在 1890 年，他就曾提出过一种电图象的远距离接收系统。在十多年以后他所研制的系统中有一个用于发射的帧扫描尼普科夫圆盘和一个作接受机用的阴极射线管。差不多同一时期，英国发明家 A. A. 坎贝尔—斯温顿（A. A. Campbell-Swinton）也提出了一种电子式的电视系统，其中的阴极射线管不仅用于接收，而且还用于发射。他于 1908 年在科学杂志《自然》上发表了他的设想，并于 1911 年及 1920 年再次认真钻研了这个问题，并解释说：用这种方法发射的图象可在1/25 秒内分成 400 000 个亮度不等的点，在接收时也能将这些亮点复原成图象。

鲍里斯·罗申教授所研制成的电视接收机工作得并不理想，但这一工作却强烈地吸引了他的一个学生兹沃里金（Vladimir Kozma Zworykin）。兹沃里金在圣彼得堡工学院上学时，就在罗申教授的指导下开始了有关电视的研究。1912 年取得了该学院电气工程博士学位后，他出国到了巴黎法兰西大学研究 X 光。第一次世界大战时他参军服役，当了通信部队的军官。1919 年移居美国，不久进入西屋公司。在这一期间里他仍继续从事电视研究工作，已经想出了用全电子束系统构成电视摄像装置的方法。但还没有开始实际操作，因而还是停留在想法上，所遇到的主要难点就是电子摄像管，和坎贝尔—斯温顿一样，到 1919 年进入公司前，他想出了电荷存贮的方法，但是却缺少足够的资金来实现这个方案，虽然西屋公司选用他为该公司的研究人员，但是这个公司的实验室主要是搞无线电研究的，对电视没有兴趣，所以兹沃里金既没有从事电视研究的资金，也不能自由搞他的电视研究。因而他又辞职并转到了在堪萨斯的一家发展公司工作。1923 年他再次回到西屋公司，并与公司达成一项协议：他享有 1919 年由他发明的电视发明权，而西屋公司要有在日后购买此专利的专有选择权。也就在这一年兹沃里金发明了光电摄像管并获得了专利。第二年他又研制成了粗糙的电视显像管。他把这两种器件结合起来，组成了世界上第一个电子电视系统，并给西屋公司的领导人做了表演，但公司对电视前景没有认识，因而对兹沃里金的工作表示冷淡。

与此同时，在美国的另一位从事电视研究工作的 P. 法恩斯沃思基本上是个单干的研究者，但幸运的是他不但找到了给他以大力财政支持的人，而且一直保留有在研究中的自主权，靠着大量的自修，他已想到了全电子的电视系统，而他的工作方式则是以较简单的设备在较小的规模上进行的，开始在洛杉矶，后又到旧金山的实验室工作。到 1927 年他已能论证他的全电子系统了。这

时，他提出了第一份申请专利书，这里面包括了他主要的发明成果——析像管。经过长期的专利交涉过程后，法恩斯沃思和兹沃里金都得到了相互不同的电视传送系统的基本专利权。

1929 年，兹沃里金在对光电摄像管和电视显像管都做了改进之后，他在美国无线电工程师学会展示了第一个实验的全电子电视系统。这次表演给美国无线电公司的领导人留下了深刻的印象，他积极邀请兹沃里金到他的公司去工作。兹沃里金 1930 年进入美国无线电公司，领导了公司的电子研究所，这才在萨诺夫的大力支持下一心从事研究工作并取得了出色的成绩。

电视研究需要巨额费用，由于萨诺夫看准了电视是有远大前途的一项事业，所以公司一直毫不动摇地支持兹沃里金的研究工作。1930～1939 年间，美国无线电公司为此曾投资 1 000 多万美元（在公司获利前共花费了 4 000 万美元）。尽管如此，20 世纪 30 年代真正实用的电视并未出现。同时，使用当时的器件，在室内摄像必需特别的照明，当室外天阴时也无法工作。直到 1939 年，美国无线电公司的工程师们在兹沃里金的领导下，研制成了灵敏度比以前的光电管高 10 倍的正析像管，方才使得在屋子里采用普通照明摄像成为可能，就在这一年，美国第一台电视机上市。

电视的研究始于欧洲，后来转移到美国。1936 年，英国广播公司就正式开始电视广播，交替采用贝尔德的机械方式和马可尼的电子方式。同年，美国无线电公司在纽约使用兹沃里金方式也开始了实验广播。在 1940 年以前电视广播的基本技术问题都已得到了解决。但是，当时的广播质量很差，电视观众只能在暗室里看 6 英寸屏幕的电视机，接收机价格很高，故障又多，广播台又常出毛病，节目不但少而且时常中断。

第二次世界大战以前美国对电视研究有贡献的主要单位有贝尔研究所、通用电气公司、西屋公司、美国无线电公司和法恩兹

沃思公司等。其中美国无线电公司对开发最新电子管电视机的贡献最大。1941 年美国销售了几百台电视机。在纽约、费城和芝加哥开始了定期的电视节目。

第二次世界大战时，电视广播中断，可电视研究实际并没有停止。科学研究者曾秘密地研究用电视来进行无线电操纵飞机的炸弹投掷。此外，由于战时对雷达的研究而开拓出了适于电视传输用的超短波技术；雷达显示器的研究，又使阴极射线管技术有了很大的进步。这些都为战后电视的发展打下了基础。

电视的发展历史和收音机不同，收音机是在通信的基础上发展起来的，在没有认识到它的娱乐用途以前，主要是作为通信而存在的。电视是直接作为娱乐手段发展起来的，通信的应用反而是以后的事情。无线电广播传播声音，带宽约 5 000Hz 就够了；电视机的信息传输量比收音机约大 1 000 倍，带宽需要 5MHz。

电视的勃兴是在第二次世界大战以后，它作为恢复和推进电子工业的重要力量而获得了迅速发展。1946 年，美国年销售电视机不过 6 000 台，1950 年上升到 700 万台，以后 10 年里徘徊在 500～800 万台之间。再后来，由于彩色电视机的兴起，自 1964 年起电视机销售超过 1 000 万台。

彩色电视的设想可以追溯到 1908 年。关于机械式彩色电视装置，1928 年英国的贝尔德，1929 年美国贝尔研究所的艾夫斯都曾做过实验。1939 年英国哥伦比亚广播公司设计了旋转圆盘式系统，这属于一种机械式混合色的彩色电视，第二次世界大战后于 1951 年开始广播，由于朝鲜战争而中止。另外，美国无线电公司的劳（H. B. Law）在 1949 年研制成了阴罩彩色显像管，并用它于 1950 年装成了与黑白电视机兼容的彩色电视机。由于彩色显示还有一些问题必须改进，所以直到 1954 年美国才正式开始彩色电视广播。美国采用的彩色电视制式叫做“正交”（NTSC）制，使用

的国家有美国、加拿大、日本等。除此之外，世界上还有：1957年法国提出的“塞康”（SECAM）制，使用的国家有法国、原苏联、捷克等；1961年西德提出的“帕尔”（PAL）制，使用的国家包括德国、奥地利、比利时、巴西、荷兰、丹麦、斯堪的那维亚三国和英国等。三种彩色电视制式各有特点，自成系统，是不能互相收看的。我国于1958年5月1日开始黑白电视广播，20世纪60年代末开始了彩色电视的试播，目前全国电视已经普及。

电视机的发展经过了黑白电视机到彩色电视机，从电子管、晶体管到集成电路电视机阶段。从电视机上只能显现一个画面到几个画面，现在已能同时出现9个画面。电子管式的显像管正向着平板电视发展。平板电视板有场致发光、等离子体显示、液晶显示、发光二极管显示和荧光显示5种。每种都已研制出样机。1977年日本夏普公司制成一台6英寸的场致发光平板电视机，可以挂在墙上。我国也已有了荧光显示的平板电视样机。

20世纪80年代，先进工业国家的电视的发展方向是使电视具有更多的功能，让电视机与微型计算机结合，这样，它可用作游戏机显示、双向可视图象通信终端和接收电视文字传播，用户只需在电视机上加装一个译码器，便可随时收看天气预报、股票行情、商品价格、一般新闻简报等。不少国家正在陆续开展这项业务。

20世纪90年代，已出现微机与电视机的结合体——多媒体，并且微机已联网。这样的多媒体除了具有前面所说的电视机功能外，主要的功能为两个方面，一是利用联网传递信息，就是可对世界各地进行双向数字通信；二是可以获取到所有联网单元的信息，如：商业信息、经济情报、所有联网的图书馆的书籍、报刊、杂志资料等。

第六章 现代通信

6.1 传统通信方式所面临的问题

随着时代的发展，通信容量急剧增加，这是传统通信方式所面临的重大挑战。在无线电通信发展史上，为了增大通信容量，一般采取提高频率的办法，通信频率已从长波、中波、短波发展到今天的微波以及微波波段中的毫米波和亚毫米波。已经使用的4 000～6 000MHz的微波波段，仅可容纳50万路电话，或者同时传送250个频道的彩色电视节目。相对于通信容量的需求来说，自然满足不了。为此，前不久启用了40GHz的毫米波波段，也只能容纳400万路电话，4 000路电视，对将来的需求量来说，仍然感到紧张。为了满足人类信息交流对通信容量增加的需要，各种新的通信方式应运而生。

无线电通信面临的另一个难题是远距离通信。短波通过电离层反射，可以实现运距离通信，但这种通信方式受电离层变化的影响较大，而且容量也很小，只适宜传送有限路数的电话信号。微波的通信容量虽然大，但只能在视距范围内直线传播，为了实现远距离微波通信，人们只能在微波传播的途径上，每相隔50～60千米设置一个中继转播站，以接力方式达到远距离通信的目的。但是，这样做要耗费大量的人力、物力和财力。

传统的无线电通信也称模拟信号通信。模拟信号方式存在两个问题，一是抗各种干扰的能力较差，日趋严重的电磁、噪声干扰会严重影响这种通信方式的工作；二是不能与计算机、数据库、数据网络等现代化的信息处理、存贮、传输系统兼容，因而不能实现通信的高速度、高效益、大容量和自动化，同时，也不容易

实现通信的高度保密。

6.2　数字通信

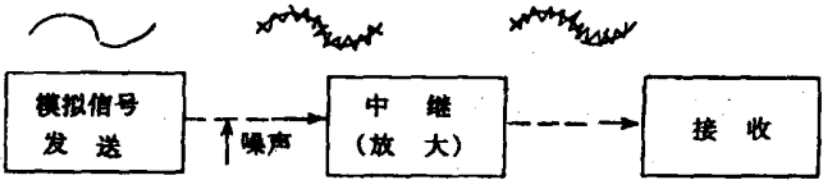
数字通信，就是用数字信号作为载体来传送各类信息的通信方式。文字、声音、图象等各种信息，都可以用一连串的数字脉冲（常用二进制编码）表示，只要把这些二进制数字传送出去，经接收端解码，就能重现原来的信号。

1. 数字通信的优点

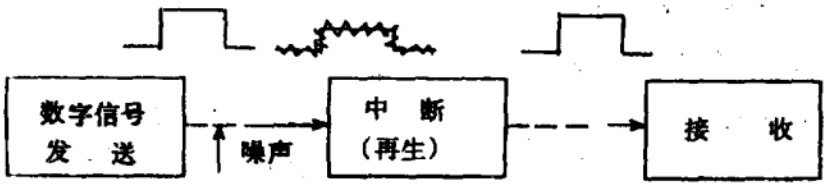
数字通信的优点之一是抗干扰能力强，数字信号只有“1”和“0”两种状态，接收机只须分辨出脉冲瞬间电流或电压的“有”和“无”两种状态，而不像对模拟信号那样，必须分辨出信号强弱变化的细节。即使在传输过程中数字信号受到干扰，接收端也能比较容易地分清“1”和“0”两种状态。这犹如在能见度较差时去辨别远方人物的“有”和“无”，要比去鉴别远方人物的容貌和服装细节容易得多一样。不仅如此，数字信号上叠加的噪声也能较好地得到滤除。我们知道，在远距离传送模拟信号时，中继站必须把接收到的已经衰减了的信号加以放大，这时叠加在信号上的噪声也一起得到放大，因此，传输距离越远，积累的噪声也就越大。然而，在传输数字信号时，中继站的作用则是重新形成与原来信号变化规律相同的信号。换句话说，中继站起到了再生信号的作用，这种再生（中继站）能对数字信号进行识别、判断、并滤除噪声。因此，在传输数字信号过程中，噪声不会因积累而增强。所以，数字通信比模拟通信具有更强的抗干扰能力。图1.6-1表示了数字通信滤除噪声的过程。

数字通信的另一优点是保密性强，各种信号经数字化处理之后，变成了一系列“1”和“0”组合的数字信号，直接收听这些数字是听不懂的。如果把传送的数字信号再稍做一些变化和处理，

就可实现高保密度的加密，满足保密电话的要求。



(a)模拟信号传输受干扰情况



(b)数字信号传输受干扰情况

图 1.6-1 数字通信滤除噪声的方框图

数字通信还具有与现代信息处理、存贮、变换手段兼容的突出优点。依靠这种兼容性，人们很容易实现通信方式的高速度、大容量和自动化。大量地使用数字集成电路和微处理器，还能使数字通信设备实现固体化、小型化和智能化。

2. 计算机通信

数字通信的出现，为通信技术与计算机的结合提供了可能性，使现代通信既能传输信息，又能进行信息交换、存贮和处理。信息处理系统和信息传递系统结合在一起之后，不仅人与人之间可以进行通信，而且人与计算机、计算机与计算机之间也可进行通信，从而把用户、计算中心和数据库三者联系在一起，这种人与计算机之间和计算机与计算机之间的通信，称为计算机通信，也叫做数据通信。它是以传送数据为业务的一种通信。计算机通信的产生，表明计算机和通信技术两者已融为一体。建立在数字通信基础上的计算机通信，已经成为现代信息技术的主要支柱。计

算机能加工处理和存贮信息，将信息变换成不同的格式，并可根据信息进行快速的运算、逻辑推理和判断等。存贮在计算机存贮系统中的数据、资料、知识与信息，不论是计算机加工处理后的信息，还是计算机根据已有的知识做出的判断和决策信息，都可以通过数字通信系统高速而有效地传输到各处。这样，不同领域产生的各种图表、文字和数据等大量宝贵的信息，都可以利用计算机自动进行归纳、处理、存贮和检索，然后利用数字通信自动地进行交换、转移和交流，从而达到知识共享的目的。由于计算机通信的出现，像电子报纸、电子邮政、电子银行、电子医生等都将一一实现。

3. 数字通信网

由于数字通信具有可靠、准确、保密性好和应用灵活等优点，因而数字通信网正在逐渐替代传统的模拟通信网。作为一个国家的神经系统的通信网，是现代社会的一个重要组成部分。通信网的作用，是在许多分散用户点之间互相传递信息。一般地说，通信网由用户终端系统、传输系统和交换系统三大部分组成。用户终端是信息的源和宿，它们可能是电话机、电传机、传真机、各种数据终端设备或计算机等。传输系统的作用是连接各个终端的交换中心，或为交换中心之间提供传送信息的通路。根据需要，传输系统可以选用明线、各种电缆、光纤、微波中继和通信卫星等。不同传输媒介可以采用不同的调制、复用的多址传输方式。在一个通信网中，尤其是长途网，一对用户的通信可能要经过多次转换和综合使用多种传输手段。例如国际间的通信，多半是由卫星转发，然后再通过地下电缆传输，最后才通过市内电话接到用户。交换中心的作用，则是根据终端发出的信号提供相应的传输电路之间的连接。交换系统分为电话交换系统和存贮—转发式交换系统。数字通信网的交换系统是数字程控交换机，由计算机完成交

换功能。

各种各样的通信网，如电话网、电报网、广播网、电视网和计算机网等，倘若它们各自独立，必然会造成设备、线路和人力的重复和浪费。采用数字通信，可以使现有的各种形式的通信网联结成一个统一的数字通信网。目前，国际通信正在发生一场新的技术革命，即出现了综合业务数字网（ISDN）。这一技术是把电话、电报、数据通信、传真、电视等业务，都用同一种线路和设备传输，相当于把原来相互独立的各个网络合并成一个共同网络。数字信号的形成和使用都可以用同一种线路和设备传输。这样的通信系统已不是仅由收发信机和线路设备构成的了，而是包括了各种终端设备、交换设备、传输设备、控制设备和电子计算机的一个有机整体。因此，现代通信网是一个规模庞大、结构复杂的大系统，服务面非常宽广，服务方式和方法也多种多样，能够满足人们对通信提出的越来越高的要求。

美国、日本和西欧一些发达国家，计划在20世纪末和21世纪初，建成综合业务数字网，并且打算逐渐由区域综合业务数字网扩大到全球数字网。这一计划所设想的步骤为：第一阶段，建立综合数字网，实现数字传输和数字交换；第二阶段，发展窄带的综合业务数字网，实现用户到电信局的数字通信；第三阶段，实现业务、速率的全面综合，建立宽带综合业务数字网。

目前，虽然模拟通信在整个通信领域还占主导地位，但随着光纤技术、微电子技术、数字变换和交换技术的发展，预计到21世纪初，数字通信将代替传统的模拟通信。

6.3 卫星通信

1962年7月10日，美国发射了“电星一号”通信卫星，第一

次将电视广播节目由美国传送到大洋彼岸。1969 年 7 月 20 日，世界各地的人们在电视荧屏前看到美国宇航员阿姆斯特乘“阿波罗”号飞船登上月球，并听到他在月球上说话的声音。这一重大新闻的转播，就有通信卫星的功劳。现在，从国际体育盛会的转播到世界范围内的科技、学术、医疗等信息的交流，都离不开通信卫星。

通信卫星有“同步”和“异步”两种形式。同步卫星处于地球赤道上空 36 000 千米的轨道上，它以每小时 1 170 千米的速度由西向东飞翔，环绕地球一周要飞过265 680千米，需要 24 小时，与地球自转一周的时间相同。因此，通信卫星以相同的角速度与地球“同步”旋转，从地面上看去，这颗卫星是静止不动的。因而，“同步卫星”又称“静止卫星”。一颗同步卫星向地面发射电波的波束约 17°左右，大约可以覆盖地球表面的三分之一的面积。因此，三颗同步卫星发射的电波便可以覆盖全球，实现全球通信。如图 1.6-2 所示。

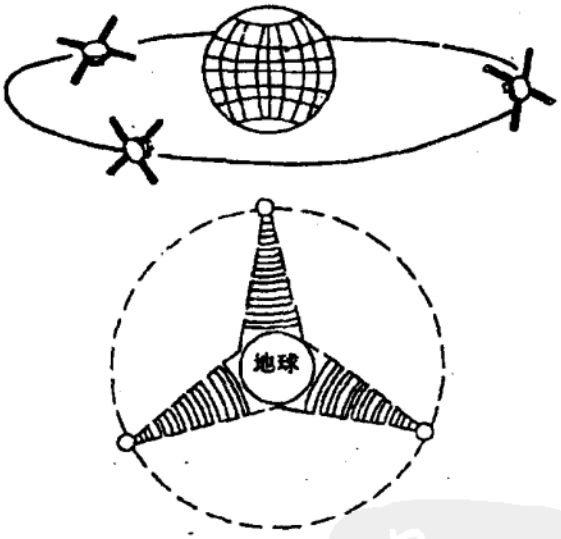


图 1.6-2　同步通信卫星

利用一颗通信卫星能使地球上距离一万多千米的两地实现通信，这相当于由 200 个中继站组成的微波中继线路所能服务的通信距离。

1. 卫星通信系统

卫星通信系统是由通信卫星和地面发射站、接收站三大部分组成的。通信卫星的主体是“空间转发器系统”，它主要由接收机和发射机两部分组成，其作用是为地面发射来的信号补充能量。从地面发射到卫星的信号（上行信号）要经过很远的自由空间才能到达卫星的转发器系统，这种上行信号在传输途中会受到很大的衰减，混进大量的噪声。经转发器中的接收机和发射机放大、滤除干扰后，这种信号再由卫星天线转发下来（下行信号），下行信号同样要经过很长一段自由空间才能到达地面站，如图 1.6-3 所示。

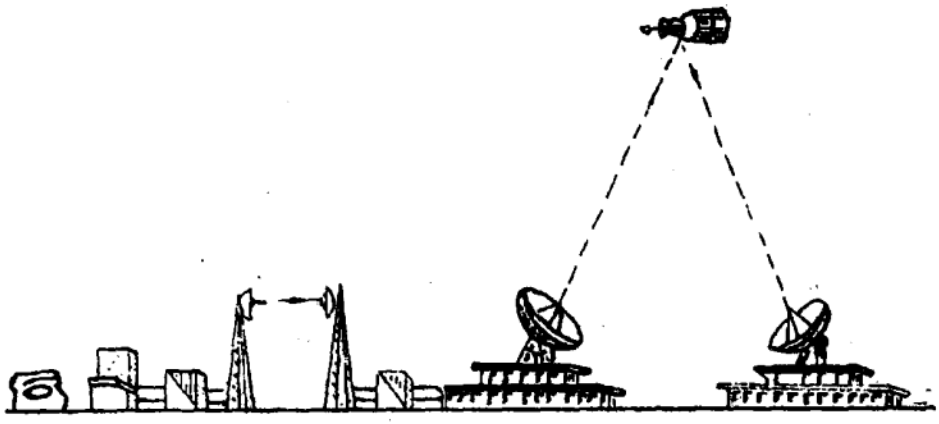


图 1.6-3 卫星通信线路示意图

高悬在天空中的一颗同步卫星所发射的无线电波束能覆盖地球表面很大一部分区域，这部分区域叫做通信卫星的覆盖区。在覆盖区内的任何地方都能收到卫星转发的电波，因此，设在地球上各个地点的地面站，相互间可以通过卫星进行通信。这种能同时实现多方向、多地面站之间相互联系的特性，叫做卫星通信的多址联接特性。多址联接特性是卫星通信的重要优点。卫星的多址联接通信如图 1.6-4 所示。

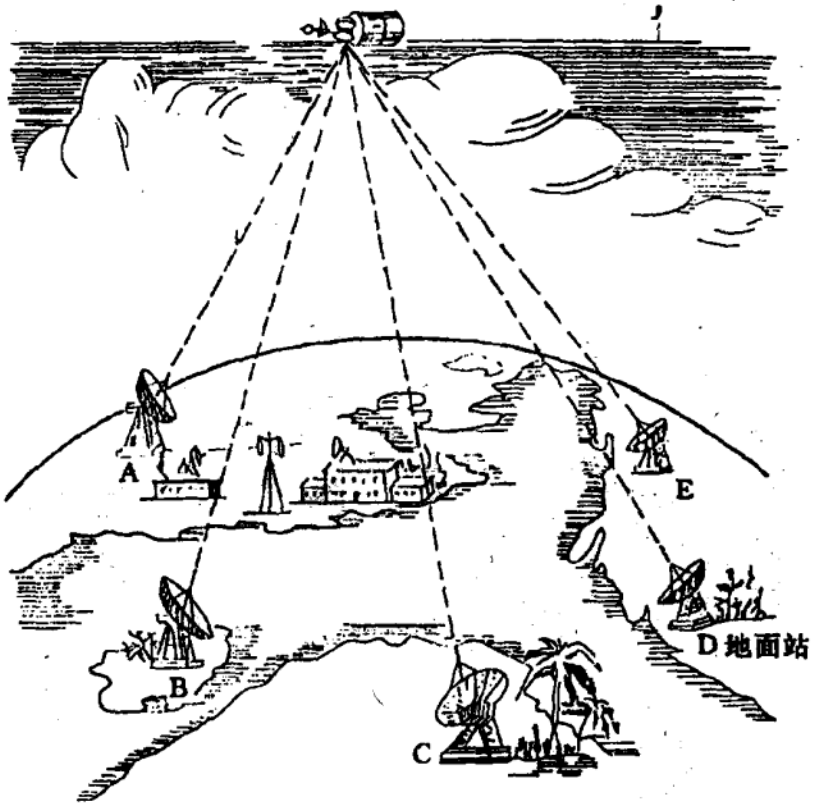


图 1.6-4　卫星通信多址联接的示意图

通信卫星向不同地面站发送信号，地面站从诸多信号中分离出自己所需信号的方法一般有下列四种：第一种方法是频分多址联接方式。这是根据不同的载波频率来区分信号的，对发到不同地面站的信号分配给不同的载波频率；第二种方法是时分多址联接方式，即按照一定的顺序，在不同的时刻，分别向不同的地面站发射信号，而各地面接收站也分别在上述规定时刻接收自己所需的信号。第三种方法是空分多址联接方式，它是通过卫星上多部不同指向的窄波束天线，构成与地面站一一对应的联接。第四种方法是码分多址联接方式，即对发到各地面站去的信号分配给不同的编码波形。

通信卫星具有多址联接特性，因而卫星通信线路具有很大的灵活性。例如：在通信卫星的覆盖区域内，不管是正在飞行的飞机或航行的船只，还是急驰的汽车，甚至步行的行人，都可以随时使用通信卫星，如图 1.6-5。

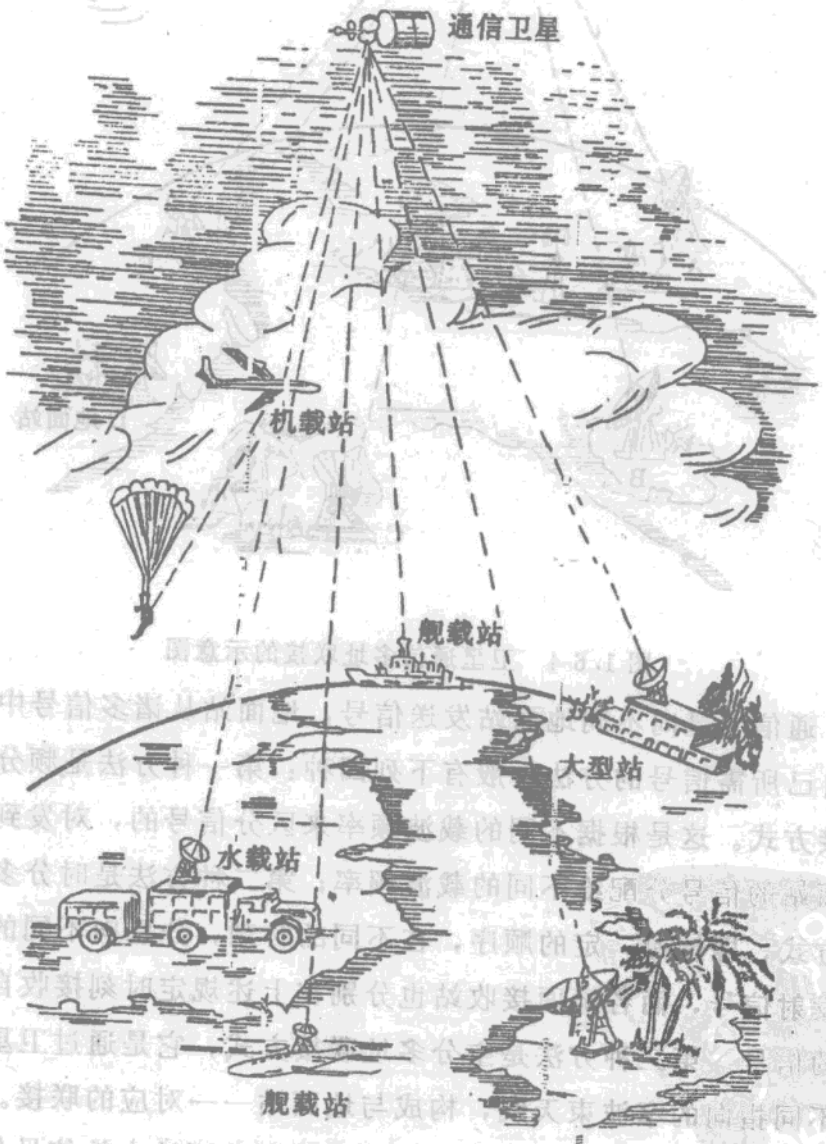


图 1.6-5　卫星通信具有极大的灵活性

2. 卫星通信的发展

目前，卫星通信使用的载波频率主要是1～10GHz频段。由于处于这个频段上的电波传播特性最好，所以人们称它为“电波窗口”。随着通信业务的急剧增加，这个频段也日益拥挤，因此卫星通信的频率范围还在不断扩大。1971年，卫星通信频率上限已进入270GHz的毫米波频段。频率越高，频带就越宽，通信容量就越大。同时，地面站的天线和卫星上的天线面积也可以做得小些。

卫星通信正处在飞速的发展时期，随着频率的不断提高，通信容量将越来越大。进入20世纪80年代，新一代“国际卫星通信5号”的通信容量已达到12 000双向话路和2路彩色电视。近年来，人们设计成多通道转发器，一颗通信卫星内设置的转发器多达几十个。随着电子技术的发展，多功能的通信卫星必将问世。到那时，通信卫星将不再只是简单的中继站，而是能够进行大量信息处理和交换的“空间交换机”，并能与地面通信系统、计算机网络联网，实现信号的复用、编码、调制以及起到线路控制和分配的作用。与此同时，地面站的结构也将大大简化。

目前通信卫星的发展趋势是多通道化、多功能化、数字化和程序控制化。除了通常的电话和电视业务外，卫星通信还能开展电视电话、电子邮政、电视教育、印刷传真、电话会议、数据传输、环境数据收集等业务工作。总之，卫星通信的内容将变得更加广泛、更加丰富，既能实现地面站与地面站之间的通信，又能实现地面站与宇宙飞船、卫星与卫星之间的通信。它的发展已经促进了天文学、地理学、生物学、气象学、军事科学、医学、农业、宇航、地质学和资源勘探等一系列科学技术的发展。

6.4　激光通信

激光通信与无线电通信在原理、结构以及通信过程方面都是

相似的，所不同的只是传送信息的运载工具是激光，而不是无线电波。由于光的频率很高（10^{13}～10^{15}Hz），因此可以用来传递更大容量的信息。当每个话路的信号所占的频带宽度为 4kHz 时，利用激光通信，可以容纳 100 亿个话路。如果用它来传输频带宽度为 8MHz 的彩色电视信号，也能同时播送 1 000 万套电视节目。

激光器是激光通信的激光光源，电信发送设备将话音变为适于对激光进行调制的电信号，这个信号加在光调制器上进行光调制。光调制的方法有直接调制、电光调制、磁光调制等。经过调制包含有话音信息的激光束再通过传输介质发送出去。目前采用的传输介质有自由（大气）空间和光纤两种。前者称为空间直接传播，后者称为光纤传播。

在接收端安装有光接收机，它的主要器件是光探测器件（或检测器件），任务是把光信号变成电信号。电信号再经过电信接收设备，使其还原成原来的话音。目前，光探测器已经比较成熟。常用的有光电倍增管、光电二极管、硅光电二极管、PIN 光电二极管和雪崩光电二极管等。

1. 卫星间的激光通信

利用同步卫星进行洲际间长距离通信，是超远距离通信的一种有效方式。但是，利用同步通信卫星进行超长距离通信，存在着话音不自然，对方反应迟钝以及伴有一种“回声”干扰等问题。如果利用通信卫星超远距离传送数据、图象和密码等信息，则影响更为明显。反应迟钝、“回声”干扰是由于远距离通信的“双跳”式传输造成的。例如：把阿根廷的电视节目传送到我国，由于一颗同步通信卫星不能同时覆盖南美洲的阿根廷和亚洲的我国，必须使用两颗同步卫星。具体传输过程是，把阿根廷的电视节目发给太平洋上空的一颗通信卫星，由那颗卫星把电视节目转发给英国的马特莱卫星地面中继站，这叫一“跳”；然后，该中继

站再把信号发送到印度洋上空的一颗卫星（第二“跳”，即“双跳”），最后才由该卫星把电视信号转发给我国。这个过程中的每一“跳”，信号传输路径的长度是8万千米，时间延迟大约是0.3秒，完成“双跳”时间延迟总共是0.6秒。在通信中，信号的传输时间是以微秒甚至纳秒计算的，所以，延迟0.6秒是一个很大的数字，这就是造成通话感觉不自然的原因。

卫星间的激光通信可以解决这个问题。悬挂在同步轨道上的卫星装有激光收信机和发信机，地面发送站把无线电波信号发送到一颗卫星上去调制激光束，这种经调制的激光信号在空间直线发送给另一颗卫星，后者再把光信号还原成无线电信号发送到地面接收站。这一技术消除了远距离传输的“双跳”，从而消除了通话不自然的感觉。

卫星间激光通信还能解决异步卫星的通信间断问题。近年来，有许多在低轨道上飞行的卫星执行着地球资源的勘探、气象预报和军事侦察等任务。这些卫星位于低层轨道上，每天将环绕地球转几圈（因而称异步卫星）。它们在运行到地球的另一面（背对接收站）时，由于地球的遮挡，不能直接把数据发回接收站。这时，低轨道卫星与地面站之间的通信将暂时中断。如果使用地面站对电波进行中继，由于电波经过几次跳跃，则会造成时延。如果采用激光卫星通信就可以解决这个问题。首先，低轨道卫星以激束（或无线电波）向第一颗同步卫星发射信号，这颗同步卫星再以激光束向第二颗同步卫星发射信号，然后再由第二颗同步卫星向地面接收站发送信号。这样传输方式既可以实现全天不间断通信，又因取消了中继站而减少了时延。

卫星间激光通信具有通信容量大、可靠性高等优点，能满足军事通信快速、保密的要求，在军事上有重要的应用价值。例如：万一卫星地面接收站遭受破坏，人们可以把低轨道卫星（或通过

其他手段）得到的数据先发给一颗同步卫星，利用卫星激光通信暂时发送到安全的地方(或储存起来)，在适当的时候再发回地面。

2. 对潜激光通信

近年来，潜艇的性能不断得到改善，战斗力也相应地得到加强，但是，指挥员与深水潜艇之间的通信问题却一直没有很好地解决。能穿透海水到达深水潜艇的甚低频无线电波信号，只能以极低的数据速率缓慢地传输，哪怕是几个字节的信息，也需要几分钟甚至更长的时间才能完成发送、接收和译码。因此，在与指挥员进行通信联系时，潜艇必须放慢航行速度。如果改用其他频率的无线电波进行通信，由于那些电波不能穿透海水，潜艇为了通信则必须上升到水面，从而使自己暴露在敌方监视之下。由此可见，用无线电波对潜艇进行通信，时间长、容量小，不仅危险，而且信号还易被敌方截获。如果采用被称为海水窗口的蓝激光与潜艇进行通信联系，那么，无线电波对潜艇通信的上述缺点都可以较好地得到克服。波长为460～530微米的蓝激光在水下的衰减最小，能穿透300～400米深的海水，可以满足深水通信的要求。为此目的，可供选择的激光器有倍频钕钇铝石榴石激光器等。

蓝激光对潜通信的方法，是利用无线电波把要传送的信息由地面指挥站发给卫星，安装在卫星上的发射机把电信号转换成蓝激光信号，然后下行发送给载有蓝激光接收机的潜艇，或把载有指挥信号的蓝激光从飞机上直接发送给潜艇。由潜艇上的计算机去控制探测系统对穿透海水的激光束进行扫描、捕捉，这样就实现了卫星（或飞机）与潜艇间的激光通信。只要在地球同步轨道上设置三颗激光通信卫星，就可以实行卫星对卫星、卫星对潜艇的全球激光通信。

由于蓝激光通信具有通信信息量大，防窃听和抗干扰能力强等优点，因此蓝激光是对潜通信的一种理想载体。部署潜艇激光

通信卫星，将使指挥员能适时的对处在深水工作区域的潜艇进行指挥和控制，为潜艇完成战略和战术任务，提供及时、准确和可靠的通信。蓝激光除了能和潜艇进行通信外，还可以控制其他水下武器，如音响水雷等。

美国在20世纪80年代初，就研制成功了蓝激光器，紧接着成功地研制了机载激光发射机。据估计，部署对潜激光通信卫星系统，需耗资10多亿美元。预计到2000年，美国的对潜激光通信系统将全面投入使用。

3. 飞机间激光通信

目前，飞机间、飞机与地面间的通信，采用的都是无线电通信形式，而无线电通信的宿敌是干扰和窃听。如果在飞机上采用激光通信系统，不但能使信息在传送过程中不易受电磁干扰和窃听，而且还能使机载通信设备变得简单、可靠。因此，飞机间的激光通信，将成为飞行员之间的话音通信、飞机与指挥所之间的数据传递的理想通信手段。

美国通用电话和电子公司为美国空军研制了激光通信系统。美国空军在某空军基地进行了一系列空-空激光通信试验，试验是在两架C-135飞机间进行的，飞行高度为1 200～11 100米，间隔为90千米以上，发射机由砷-铝-镓激光二极管阵列组成，工作波长为0.9微米，接收机由4个雪崩二极管组成。由激光收发系统和辅助跟踪系统构成的终端安装在机窗附近，方向透镜使一部终端设备跟踪另一部终端设备并与之通信。这些试验是美国空军激光通信试验的一部分，试验的目的是验证捕获、跟踪和通信能力。至今的试验已证明，高空飞机间的激光通信是安全可行的。

4. 光纤通信

光纤通信是以光导纤维作为传输媒介的通信形式，是激光通信的第二种形式。这种通信方式被称为通信史上的技术革命。

光纤通信与无线电通信相比具有许多优越性。其最大特点是频带宽，可同时容纳几十个不同波长的激光信息，光纤通信的容量非常大，一条光纤就能传送上万路电话的信息，一条直径 1cm 左右的光缆，就可供上百亿人同时通话。就以世界上目前拥有电话数目最多的美国来说（美国现有一亿多部电话机），只要用一条轻巧的光缆，就能传送美国全部电话信息，而且这条光缆还有余力传送美国所有的电视广播节目。

光纤对电磁干扰和多种形式的其他干扰具有良好的抗干扰性，敷设线路时，可以不考虑高磁场区域的影响，也不必配置累赘的屏蔽装置和过多的滤波器，光子通过光纤不产生电磁场。因此，光纤传输线不会被窃听，也不产生易被敌方测向仪捕获的射频图象，所以，保密性好也是光纤通信的一个突出优点。

在光纤技术的研究及应用方面，美国、日本居世界领先地位，应用范围包括航空电子设备、地面战术通信、基地通信、舰载通信、卫星地面站、雷达信号远距离传输、战略武器系统、C^3 系统（指挥、控制和通信）、通信保密设施及传送电话、电视等。

在亚洲东北部，美国铺设了一系列海底军用光缆，这些光缆将取代正在使用的对流层散射无线电通信系统。美军还终止了它的大部分远程 MX 导弹通信网的组建工程，用总长 15 000 千米的光纤通信网取代。美国的大型光纤项目——跨大西洋（6 500 千米）和太平洋（10 000 千米）的海底光缆，于 20 世纪 80 年代末、90 年代初正式使用。

目前，主要是研究降低光纤的损耗问题。贝尔实验室成功地进行了 119 千米的无中继传输实验，日本实现了 134 千米的无中继传输实验。现正在研究每千米的损耗仅 10^{-2}—10^{-3}分贝/千米的光纤维，如果成功，其中继距离可达 5 000 ～10 000 千米，这将使洲际海底光缆远距离通信开创一个崭新的局面。

光纤通信的应用范围正在扩大，性能也不断完善。目前国际上已有几十个国家使用了光纤通信。美、日、英、法等8个国家已经宣布，今后建设长途通信干线，不再使用电缆而采用光缆。随着各国对光纤通信的研究，将来的光纤通信将取代许多现行的通信方式。

第二篇
半导体的发展

第一章 发明晶体管前的回顾

1833 年英国著名的自学成才的实验物理学家法拉第（Faraday）首先在硫化银中发现了电导率随温度增加的半导体性质。对金属来说，电导率一般随温度下降，当时法拉第本人或其他物理学家无法从理论上解释这种半导体材料电阻的负温度特性，当然更谈不上半导体这个名称了。接着法拉第的发现，1839 年法国的科学家贝克勒耳（Becquere），在某种材料和电解质界面进行光照时，发现了产生电压的光电效应。当时的这种材料，就是经过一个世纪后命名为半导体的材料。

经过法拉第和贝克勒耳的半导体温度特性和光电特性的发现之后，很多科学家虽然从理论上还不清楚，但在实验上进行了很有益的工作，并给以后的理论分析提供了有利的依据。比如，1873 年史密斯（Smith）在硒中进行光照时，发现了电导率发生变化的光电导效应。从这几种实验工作

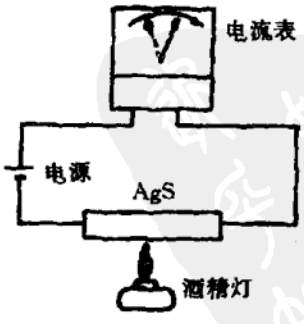


图 2.1-1 法拉第的实验

中的伟大发现看出，半导体对温度和光很敏感。虽然当时没有从理论上搞清楚这种半导体的性质，但随着原子物理，量子物理学的发展，从能带论解释清楚了半导体的性质，即在半导体中输运电荷的载流子电子，比金属少很多而对温度和光等非常敏感。

史密斯发现半导体光电现象的次年，即 1874 年，德国的物理学家布老恩（Braun）发现了金属线和硫化铅（方铅矿）接触中的整流特性，这就是世界上最初的金属半导体接触器件，这种器件后来作为火花发生器产生的无线电波检波器使用。因此，以后的很长一段时间这种器件称为矿石检波器。这种矿石检波器虽然稳定性差一些，但由于是点接触二极管，高频特性很好（见图 2.1-2）。

在 1904 年佛列明（Fleming）最初做出无线电报检波用的称为佛列明管的一种真空二极管之后，矿石检波器就开始过时了。到了 1906 年福奥列（Forest）等做出三极真空管之后，由于当时的真空二极管和真空三极管的可靠性和稳定性比矿石检波器要好，因此，矿石检波器被彻底淘汰了。

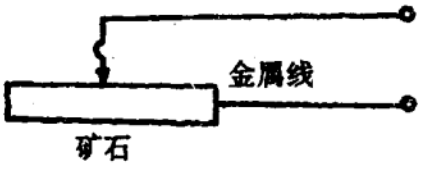


图 2.1-2　矿石检波器

由于不再使用矿石检波器，人们就不想进一步了解它的工作机理，也就是半导体器件的进一步发展遇到了阻力。实际上，一直到第一次世界大战结束，仍没有引起人们对固体现象，即半导体现象的兴趣。

然而，自古以来对固体物理的理论研究一直在不断地进行着。1900 年德国的著名科学家普朗克（Plank）提出了量子的假说，这个假说不仅奠定了原子论的基础，最终也奠定了固体电子论的基础。根据普朗克的量子论，著名科学家爱因斯坦（Einstein）在 1905 年从理论上解释了贝克勒耳发现的光电效应现象。过去科学家们

虽然推断由于光子的原因，从某种材料发射出电子，但是，普朗克和爱因斯坦之前谁也没有解决这个难题。如果被发射出的电子数与入射光的强度成比例的话，那么为什么被发射出的电子能量与入射光波长成反比呢？量子论出现以前这个问题谁也没有说出正确的答案。过去争论不休的光子属性问题，被量子论提出的光子具有粒子性和波动性的英明论断所解决。如果光子真的具有这种双重性，那么应该用实验来证明才能使人们心服口服。

为了证明光子的粒子性和波动性的双重性，在世界各国的有名科学研究所中，积极展开了对固体中光电效应的研究工作。其中柏林的年青物理学家波阿（Pohl）和X射线的发明者德国物理学家伦琴（Röntgen）对固体中的光电效应和发光性质进行了研究。然而，由于当时的历史条件，尤其是得不到高纯度材料，使得他们没有碰上让晶体管诞生的好运气。

到20世纪20年代初为止，一般都说金属是很好的导体，因为金属中有丰富的电子被利用于导电，也就是说，施加电场时这些电子向阳极进行运动而传导电流。同样，这些电子输运动能而传导热能。但是定量描写固体中的电子行为，就得利用1926年奥地利物理学家薛定谔（Schr dinger）发表的有名的量子力学方程式。在以后的10年时间里，热心的物理学家们借助于薛定谔方程式，逐步解决了上世纪没有得到解决的固体中的很多现象。

一方面是理论物理学家们从理论上解释明白了电子的概念、能带论、原子价等的理论问题，另一方面是对数学处理不太感兴趣的科学家们则利用各种材料进行的实验研究工作。比如，20世纪20年代中期研究出改善的固体整流器，得到了比可靠性低的矿石二极管非常大的电功率，这种整流器是重叠一面氧化的铜板而构成的。虽然当时不清楚这种结构整流器的工作原理，但20世纪30年代生产了相当数量的产品，同时利用硒片代替氧化铜片，解

决了这种整流器重叠层结构正向电阻高的问题。

在20世纪30年代末，英国的莫特（Mott）、原苏联的达维多夫（Davydov）、德国的肖特基（Schottky）等物理学家对金属和半导体接触整流机理进行了研究。研究结果表明，在金属和半导体接触部分的半导体一侧不存在输运电流的载流子，而为了与流过接触部的电子流达到平衡，在半导体一侧形成有效电子势垒。这时在半导体中施加正电压时，电子势垒减少而电流通过，这就是金属和半导体整流器的正向电流。如果在半导体中施加负电压时，电子势垒增加而电流很小，即反向电流很小，这就是金属半导体接触二极管的整流特性。在半导体中形成的势垒称为肖特基势垒，金属和半导体接触二极管称为肖特基二极管。

在第二次世界大战期间，随着雷达发展的需求，微波技术也迅速发展。当时的真空二极管满足不了微波通讯的检波工作，也就是说，由于当时的真空二极管中阴极和阳极之间的距离较大，微波段频率的反应差而整流效应降低。因此，人们又想起了高频特性很好的金属半导体接触二极管，并对它进行了积极的研究工作。这样，半导体的研究工作又被人们所重视，并且导致了1948年固体放大器，也就是半导体晶体管的诞生。从此，半导体学作为一门科学迅速发展起来，半导体这个名词也被人们所认识了。

第二章　晶体管的发明

2.1　晶体管研究工作的开始

随着真空三极管的广泛应用，科学家们也提出了固体放大器的概念，并为实现它而开始进行了工作。当时提出来的这种固体放大器的概念是与真空管栅极工作机理类似的场效应原理为基础

的固体放大器。最初的研究是1925年美国的利利沿菲得（Lilienfeld）教授从事的固体晶体放大器，他是以硫化铜为基础对放大器进行了设计，并申请了几种专利，但他的工作当时没能引起工业界的注目而最终被人们遗忘了。

1935年德国发明家亥尔（Heil）提出了场效应器件的半导体放大器。为了控制薄层半导体中的电流，他提出了使用控制电极的提案，使用材料是氧化铜、五氧化钒、碲、碘等。虽然不清楚他的这种场效应器件是否制造成功了，但由于是控制电极与半导体之间是被绝缘的，因此，他的器件是绝缘栅场效应晶体管的先驱者。1938年波阿以自己的光电动势研究实验结果为基础，研究出晶体放大器，并进行了工作。但这是一种非实用的器件，因为用线栅极控制被加热的溴化镓晶体中电流的器件，工作速度很慢。然而，这个器件从理论上证明了固体放大器制作的可能性。

虽然场效应固体放大器的概念非常简单，但它的实用器件则比结构更复杂的双极性晶体管出台得晚。场效应晶体管的原理是以在栅极中施加电压而控制半导体中的电流为基础的，但这种器件的关键技术在于控制表面能级的问题，在栅极中注入的电荷，被半导体表面能级吸附而不能对半导体中的电流进行控制。由于当时忽视了这种半导体表面能级的影响，不仅使场效应晶体管，就连双极晶体管的出台也被推迟了。

2.2 贝尔研究所的研究工作

现在看来，由贝尔研究所首先研究出实用半导体晶体管，并在1948年7月1日在纽约时报上发表这一消息并非偶然，因为它是世界最大企业研究组织之一。在从事通讯事业所有部门研究工作的贝尔研究所中，当时已聚齐金属、化学、材料化学、固体物理学、生产技术等方面的专家和技术人员。

贝尔研究所的固体物理研究室是从金属热电子发射和其他金属表面现象研究的真空管部门派生出来的研究室。在发明晶体管工作中做出主要贡献的三位科学家之一的布拉顿(Brattain)，1929年进入贝尔研究所，并在真空管研究部门工作。布拉顿是在美国明尼苏达大学获博士学位的。当时在明尼苏达大学中就有薛定谔、普朗克、索莫菲（Zommerfeld）等著名物理学家作为客座教授讲授了量子力学的新理论，布拉顿的专业是固体物理，因此，他的兴趣逐渐转移到了半导体。这样，1931年他和贝克（Becker）一起开始研究氧化铜整流器。

在研究工作中，布拉顿和贝克确认整流作用是在金属和氧化铜的接触部分中产生的。他们是在光电动势实验中发现这个道理的，即在接触部分进行光照时才能在整流器中通电流，而在半导体中进行光照时电流就不通。因此，当时的贝尔研究所和其他研究所的研究人员，利用第三电极，即控制电极制备固体放大器方面集中力量进行了研究工作。

20世纪30年代初，当布拉顿对整流器进行实验工作时，世界上有关半导体理论方面的研究工作已取得了进展。1931年英国的物理学家威尔逊(Wilson)发表了半导体的理论模型，这是把金属中电子运动的初期理论结合到半导体和绝缘体的理论模型。过了5年之后，英国的莫特、原苏联的夫伦克（Frenkel）和达维道夫、德国的肖特基等对半导体理论也做出了贡献。由于这些物理学家的讲义或论文发表，在各大学中迅速传播了对半导体的认识。这样，年青的学生们开始热心学习半导体知识。这些学生中就有发明晶体管的三人中最年青的肖克莱（Shockley)。

肖克莱是1936年在马萨诸塞工科大学获得理学学位之后，进入贝尔研究所工作的，他是在对量子力学及其固体方面的应用发展中做出卓越贡献的斯莱特(Slater)手下学习的。在贝尔研究所，

肖克莱最初是准备在真空管开发部门的戴维逊(Davidson)手下工作，戴维逊是与同行伽玛（Germer）一起最初观察到电子衍射现象的科学家，因此，他们两人在1937年获得了诺贝尔奖金。然而，肖克莱和他们一起工作的时间很短，对倍增管进行了一段研究工作之后，还是转到他自己喜欢的学科——固体物理学方面去工作了。

对肖克莱灌输晶体管研究想法的最有影响的人是当时的研究部部长、后来成为贝尔研究所所长的凯利（Kelly）。早在1936年凯利就向肖克莱谈了自己的想法，谈话内容是为了扩大通讯需要，必须用某种电子开关代替当时的机械式开关。这个谈话对肖克莱留下了非常深刻的印象，他确信凯利的想法决不是新的真空管技术，而是从根本上改变这种技术的意思。1939年12月29日肖克莱加入了布拉顿和贝克进行的氧化铜整流器研究小组。他研究了金属半导体接触附近的半导体表面层中的肖特基理论，在这个空间电荷层中施加反偏压时也观察到了载流子消失的现象。因此，他想如果增加电场时，肯定扩大耗尽层，可以用耗尽层的扩大来控制电流。这样他从理论上肯定了使用半导体代替真空管来制作放大器的可能性。

在贝尔研究所工作的化学家奥尔（Ohl）当时对性质还不十分清楚的半导体材料硅进行了研究，当时他主要观察了硅探针检波器的性质，这种检波器是作为改良型的微波检波器被进行研究的。为了改善整流器特性，他与贝尔研究所的冶金学学者共同进行了研究工作。

两位冶金学学者斯卡夫（Scaff）和德拉（Theurer）发现，在真空中熔融硅材料时，可以得到纯度非常高的硅晶锭，他们把在这种硅晶锭探针检波器中施加负偏压时导电性好的硅材料命名为N型材料，相反，施加正偏压时导电性好的为P型材料。

斯卡夫和德拉接着发现N型硅和P型硅的不同点是由硅材料中的微量不同杂质而引起的结果。当时决定硅材料为P型或N型的杂质量是极少的，在分光分析中也查觉不到这种杂质的含量。据布拉顿说，当时斯卡夫是从出炉硅晶锭的嗅味中判断出其中含有的杂质为磷原子。

接着他们两位冶金学家又发现了元素周期表Ⅳ族硅和锗元素两边的元素杂质最适合于作P型和N型材料。Ⅴ族的磷和砷元素杂质在硅半导体中产生过剩电子使硅材料变成N型，Ⅲ族的硼和铟元素杂质在硅半导体中产生过剩的空穴使硅材料变成P型。对这种优雅和单纯的发现，使布拉顿惊叹不已。

他们两位冶金学家在实验中生长了一半为N型，一半为P型的晶体，做出了最初的PN结，然后切出包含PN结的晶片进行了实验。1940年初凯利部长召集布拉顿和他的研究小组一起观看了奥尔的实验。奥尔的实验是这样的，在PN结两端形成电极之后与电压表联结，然后在硅PN结晶片上进行光照。当电压表指示0.5V时，布拉顿不禁肃然起敬，因为这个电动势值比他所知的所有光电动势值大10倍以上。

这时半导体晶体管诞生所需具备的条件好像已经形成了，然而，由于第二次世界大战的爆发，肖克莱和布拉顿的工作暂停下来，他们转到研究雷达的小组去进行了检测潜水艇雷达的研究工作。当时贝尔研究所中虽然没有停止对硅半导体的研究工作，但主要任务是改善雷达用检波器的研究工作。

2.3　晶体管的诞生

第二次世界大战之后贝尔研究所组织了半导体研究小组。在二战期间，雷达用固体检波器的出现显得非常重要，因此，美国政府资助了硅和锗性质研究的计划。到1943年为止已有30个以

上的大学和企业研究所加入到联邦政府资助的研究计划中，他们都进行了雷达用半导体的研究工作，其中帕杜大学的研究成绩出类拔萃。

帕杜大学的物理学研究在赫洛维兹（Horovitz）的指导下，从1942年开始对锗的电学性质进行了非常细致的研究工作，确定了半导体锗材料中的空穴迁移率和电子迁移率之比，并做出了反向耐压非常大（150V）的二极管。虽然帕杜大学对半导体电子学的未来做出了非常大的贡献，但可惜的是二战后便几乎停止了对半导体的研究工作。有的研究工作者认为，如果帕杜大学继续进行对半导体的研究工作的话，也许他们能首先发明晶体管。

二战结束之前的1945年4月9日，贝尔研究所召开了锗材料的工作会议，并于数月之后组织了以肖克莱、摩根（Morgan）为首的固体物理研究组，这个研究组由很多研究小组组成，其中就有半导体研究小组。在半导体研究小组里有布拉顿、皮阿逊（Pearson）等的研究人员。在1945年秋，这个半导体研究小组里加入了巴丁（Bardeen）。

半导体研究小组最初的研究工作是肖克莱提出的三端电极器件为目标的场效应晶体管，以莫特-肖特基的整流理论为基础，半导体研究小组的研究人员们推断，在半导体表面和被绝缘的金属电极之间施加电场时，可以控制表面附近的电子浓度，然而，他们的所有实验均告失败。

布拉顿和巴丁开始寻找这些实验失败的原因。他们一直信服的理论是，半导体内部的自由电子数和半导体表面的自由电子数相同的肖特基场效应理论，但是，布拉顿发现肖特基的这种理论实际上不成立。他是在半导体上形成各种金属接触并观察它们的整流特性时发现的。接着巴丁提出了对电子学具有最重要贡献之一的假说，即表面能级的理论。

巴丁认为在半导体表面上无论形成什么样的电接触，其前后都应保持平衡状态。为此，在表面中被俘获的所有电子，根据表面电子电荷等量的反极性空间电荷区必须中和。利用这种理论可以说明为什么肖特基整流特性与接触时所使用的金属种类没有多大关系的实验结果。对整流作用起作用的是半导体内部和表面之间的静电势能差的缘故。

利用这个新理论，布拉顿和巴丁为了进一步研究表面能级而进行了一系列的实验。这时肖克莱指出的一个实验是，要查明表面俘获中心数是否限定的数量，他们在实验中比较了电阻率不同的半导体样品的接触势能，并得到了肯定的结果：俘获电子的俘获中心数量是一定的。

还有一个实验证明了由空间电荷区形成的电场，即内建电场的存在。在接触部进行光照时产生的载流子是由于这个电场的存在而被输运。1947 年 12 月中旬，皮阿逊和巴丁通过实验证明了随着温度的下降可以冻结被表面俘获的电子，并检测了其电场效应。

1947 年 12 月 23 日巴丁和布拉顿做了如下的实验。在锗半导体表面上形成了非常靠近（约 50μm 以内）的两个金属接触探针，也就是说，一个接触探针是发射极，而另一个接触探针是集电极，半导体则为基极，这就是最初的点接触晶体管。当天他们对最初的电路讨论了一天，第二天他们马上制作了振荡电路，结果实验非常成功。剩下的问题便是对这个器件起什么名字的问题了，他俩心中想到了相应于变阻器或热敏电阻的名字，但没有找到适当的名字（图 2.2-1）。

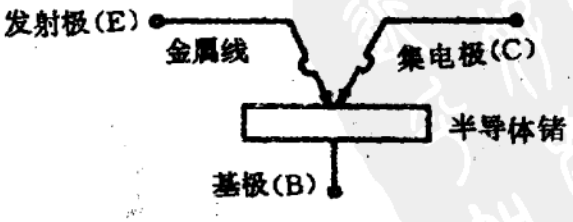


图 2.2-1　最初的点接触晶体管

有一天佩斯（Pierce）来到布拉顿的办公室，这个问题被提到了。佩斯是在卫星通讯方面很有知名度的人物，他提出了这个器件的名字应该与真空管类似的看法。他说明了真空管的重要参数是互导，即输出电流和输入电压之比，由于新发明的固体放大器的增益是由互阻抗（Transresistance）决定的，因此佩斯提出了应该命名为 Transistor，即晶体管的建议。

这是贝尔研究所正式发表晶体管之前 7 个月的事情，因为半导体研究小组完全理解晶体管中的各种现象、写出论文和提出专利等事情就需要这么长的时间。另外，为了决定晶体管的机密等级，他们还要与军方的有关人员商量，结果军方人员看了一眼这个器件之后说，它不需要机密级别，可以公开。因此，一周之后的 1948 年 6 月 30 日在纽约进行了最初的公开展示。但是，人们并没有表示出多大的兴趣。这种晶体管在被改进之前只好作为研究所的珍品，不得不保存下来。

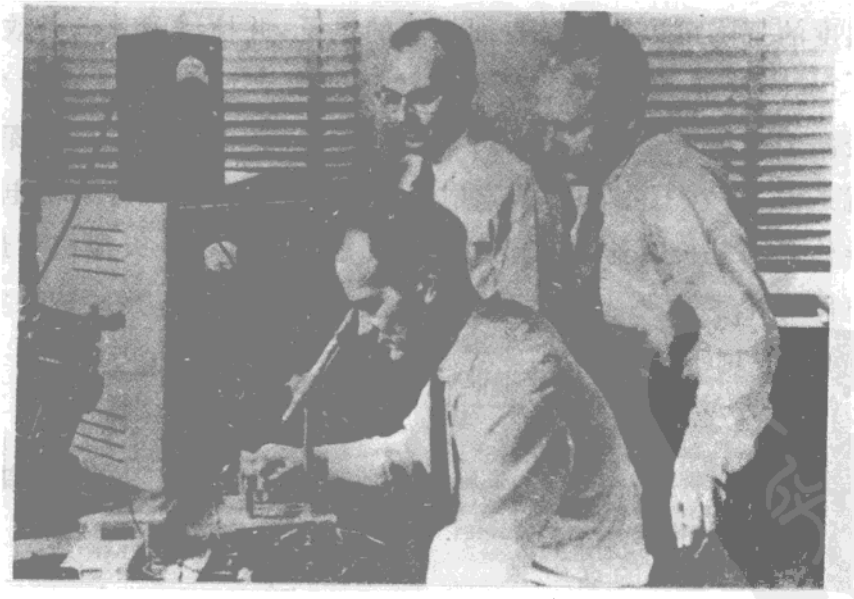


图 2.2-2 发明晶体管的物理学者肖克莱（坐者）、巴丁（左立者）、布拉顿（右立者），他们在 1956 年获诺贝尔奖

肖克莱没有直接参加点接触晶体管的发明工作（专利是由巴丁和布拉顿申请的），但他是半导体研究小组的领导，并且，很显然他在对导致这个发明的理论工作中做出了关键性的贡献，因此，1956 年肖克莱、巴丁和布拉顿三人共同获得了诺贝尔奖。

点接触晶体管发明后不久，肖克莱暂时停止场效应晶体管的研究工作，决定进一步改善双极晶体管，即点接触晶体管。他提出了 PNP 结构的晶体管，也就是说，N 型半导体两边形成 P 型半导体结构的晶体管。这种晶体管被克莱命名为结型晶体管。然而，由于当时技术条件的限制，做不出这种晶体管，因此，也无法证明这种晶体管的工作原理。

2.4　晶体管工艺技术的发展

自从晶体管问世之后，电子企业界逐渐认识到了它的优点而对其表现出很大的兴趣。贝尔研究所决定，提高晶体管的性能和可靠性是推进企业厂家生产的关键，因为初期的点接触晶体管是在锗晶片上压上有弹性的金属线而形成的，所以谈不上比矿石检波器有多大的可靠性。这种点接触结构不仅纤弱，其制造工艺也和当时的制造工艺水平不一样，特性参差不齐，价格也非常贵。20 世纪 50 年代初一个晶体管的价格约为 15 美元。因此，当时在不计价钱而只考虑产品体积小、重量轻、耗电少的军事工业中逐渐引进了这种新产品。另外，助听器则一开始就使用了这种晶体管。

在改进点接触晶体管的研究工作期间，贝尔研究所的科学工作者们进行了晶体生长技术的改善工作。早在 1948 年贝尔研究所的特尔（Teal）和李特尔（Little）成功地制备出半导体锗单晶，这就是用直拉法制备单晶的技术。经过一年多的努力，特尔终于成功地开发出准确而均匀掺杂的工艺技术。

到了 1950 年，特尔改进自己的直拉法单晶制备技术，做成片

状晶体中可以掺杂的技术。根据这种设备最终可以做出肖克莱数年前向往的结型晶体管，在制备P型单晶中途掺入N型杂质而形成很薄的N型单晶，然后继续生长P型单晶。这样可以做出很多个PNP结的单晶，然后切成PNP结的小单晶片，形成电极之后就可得到生长结型晶体管。这种晶体管比点接触晶体管噪音低很多，功率也可以做得很大。

到1952年，晶体管已经唤起了企业界对它的极大兴趣。在1952年3月召开的美国无线技术者协会（IRE）半导体会议上，由于参加者太多，连续开了两次会议。

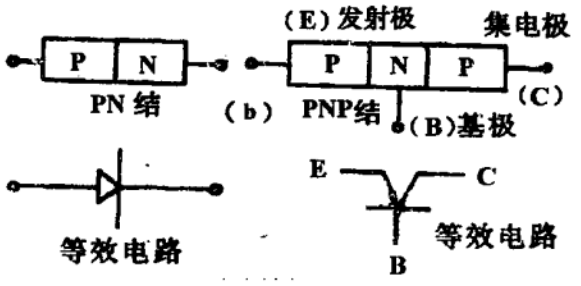


图 2.2-3 PN结二极管和PNP结二极管

晶体管的专利申请也迅猛增加，晶体管技术终于打开了自己的发展之门，当然在晶体管的发展中，军方的贡献也很大。在批量生产点接触晶体管、结型晶体管、储二极管方面军方的需要是起了很大作用的。

1952年底，点接触晶体管的振荡频率已超过了300MHz。结型晶体管已经批量生产，在所有部门都开始使用了晶体管，在使用晶体管时又有了从未想到过的新设计方案，这就是RCA公司设计的收音机输出端，这种输出端直接与扬声器联结时，可得到500mW的功率，这个电路是PNP晶体管和NPN晶体管组合的互补对称型的电路，类似的真空管电路是不存在的。这样，晶体管的需求量在1952年就爆炸性地增加了，企业厂家开始寻找自动生产的道路，主要制造技术的开发是贝尔研究所以外的厂家进行的。在储薄片的两侧铟合金化而形成的晶体管也问世了，这种晶

体管被称为合金结晶体管，RCA 公司批量生产了这种晶体管。

1953 年菲利克(Philco)公司对合金工艺进行了改进，即锗单晶片的电化学喷溅腐蚀法。在保持正电位的锗片面上，从喷嘴溅射硫酸铟，当锗被腐蚀到所需厚度约 5μm 时，用红外线传感器进行检测并停止腐蚀，然后改变锗片的电位为负电位，在锗片上镀上铟。菲利克公司自称的这种表面势垒晶体管，作为结型晶体管，最高工作频率达到了 100MHz。

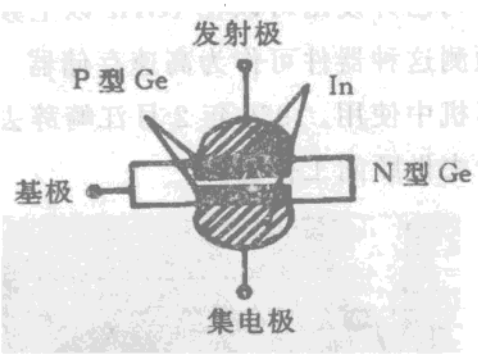


图 2.2-4　合金结晶体管

1953 年人们开始关心晶体管的标准化问题了，年初决定了引线间距、管壳形状等的物理标准，年中提出了晶体管工作特性的标准化。

通过 20 世纪 50 年代的结型晶体管工艺技术的发展，大部分晶体管企业厂家集中进行了器件和部件技术改善的研究工作，并生产出各种半导体器件。1953 年开发出双基极的锗合金结四电极器件，这种器件最初被称为双基极二极管，表现出适用于弛豫振荡电路的负阻效应。1957 年开发出 SCR 器件，这种器件是在栅电极控制下，可以阻止正向电流的一种整流器，具有大功率交流开关的特性，一般称为闸流晶体管或可控硅整流器，它具有高阻抗的 PNPN 4 层结构，在内部 N 层中注入电流时产生雪崩击穿的器件。1958 年日本索尼公司的科学家江崎玲于奈研究出利用量子力学中的隧道效应而工作的隧道二极管而震撼了半导体界。江崎是利用高掺杂锗 PN 结形成了耗尽层非常薄的约为 10nm 左右的二极管，在这种二极管的正向伏安特性中出现负阻效应，利用这种

特性，可以在高频放大、振荡、开关方面应用。到了 1959 年 RCA 公司已开发出可以在 1GHz 以上频率中工作的隧道二极管，当时预测这种器件可作为高速存储器（其工作速度相当于光速）在计算机中使用。1960 年 2 月江崎辞去索尼的工作，到美国 IBM 研究所去做顾问工作。

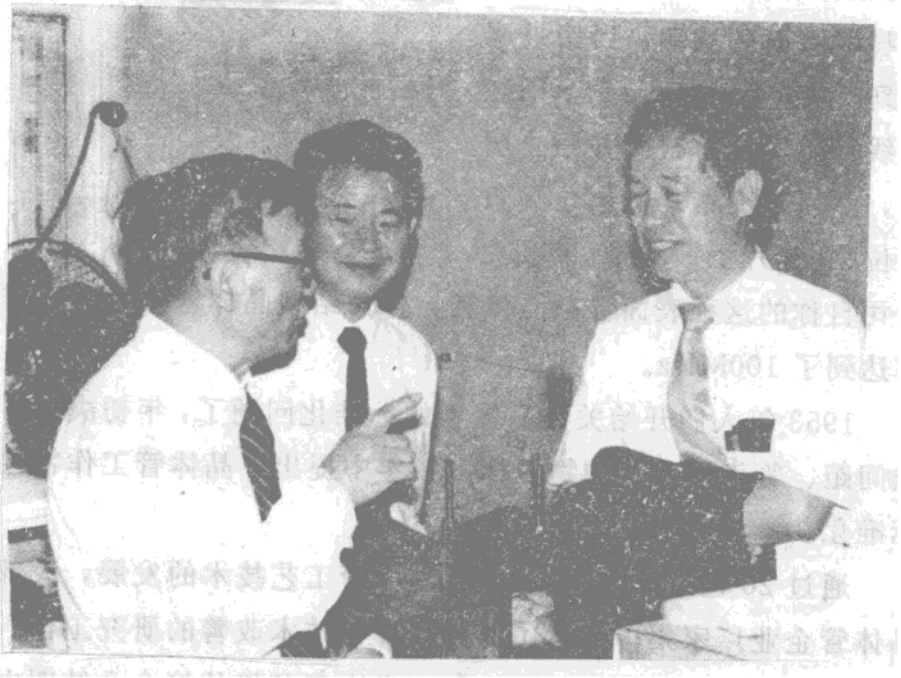


图 2.2-5 隧道二极管发明者江崎先生访问吉林大学

江崎先生（右，获诺贝尔奖） 高鼎三院士（左） 康昌鹤教授（中）

然而，人们对隧道二极管的关心很快衰退了，其原因有以下几个方面。1960 年初由于晶体管高速开关特性改善得非常好，而且通过批量生产工艺技术，成本急剧下降了。外延生长工艺制作的半导体器件受到重视从而代替了隧道二极管。当出现集成电路时，敲响了隧道二极管的丧钟。后来集成电路成为计算机的中心部件和存储器，这个领域曾是隧道二极管所向往的目标。

2.5　平面工艺的出台

虽然加入晶体管行业较晚，但非常成功的厂家是美国的得克萨斯仪器（TI）公司。1952 年该公司从贝尔研究所得到晶体管生产许可证之后，1953 年成立半导体研究所，并立即投入了生产。从贝尔研究所来的特尔领导了这个研究所，他们生产了点接触和结型晶体管，并于 1954 年发表了最初的硅晶体管，从而在半导体产业界中做出了突出的贡献。

使用熔点为 1 420℃的硅半导体材料时，可以做出比锗半导体材料工作温度范围更广泛的晶体管，这对军事工业来说更为重要。另外，由于硅结型晶体管耐高温，可以在大功率下进行工作。TI 公司采用生长结技术，成功地制造了特性好的硅晶体管。当时很多技术工作者认为，按当时的技术水平来看，要制造硅晶体管还需要数年的时间。

由于 TI 公司提前制造了硅晶体管，很多半导体厂家为了进一步改善当时的晶体管制造技术，开始召集有才能的年青物理学家和其他科学工作者。1954 年肖克莱离开贝尔研究所成立了自己的公司，他的同行巴丁和布拉顿则继续留在贝尔研究所进行基础科学的研究工作，其中巴丁由于在超导体研究工作中做出了卓越贡献，在 1972 年第二次获得诺贝尔奖。

肖克莱找了一些资助人，成立了别克曼仪器（BI）公司的分公司，并召来了 20 岁左右的 18 个工作人员，其中有克莱那（Kliner）、拉斯（Last）、格利尼奇（Grinich）、霍尼（Hoerni）、罗玻兹（Roberts）、布兰克（Blank）、穆阿（Moore）、诺伊斯（Noyce）等。

后来上述 8 个人对肖克莱领导下的企业方针感到不满而离开了肖克莱，创立了另一个半导体公司，并按照自己的想法进行了

半导体器件的研究和制备工作。肖克莱半导体研究室应该是企业公司，但实际的气氛却像大学以上的研究所。据离开肖克莱的8个人讲，肖克莱具有优秀的革新思想，但缺乏商业生产意识。1957年他们离开公司以后，由于肖克莱公司失去了骨干力量，而于1958年改名为肖克莱晶体管研究室，并强调了生产，但1959年被克列维特(Clevite)公司收买。1965年克列维特公司本身也被ITT公司收买。1969年ITT公司关闭了位于加利福尼亚州帕洛阿尔托(Palo Alto)的原肖克莱公司。这个公司虽然最终倒闭了，但在山克·克拉拉一带——现在称为硅谷的地方，肖克莱曾播下了半导体工业城的种子。

肖克莱称之为背叛者的这8个人，在与当时的费尔柴耳德摄影机和仪器公司的董事长卡特（Carter）接触并获得资助金之后，他们和电气工程师希格（Sigel）在帕洛阿尔特设立了他们自己的公司。到1957年9月中旬，他们明确了分工，希格和格利尼奇(也是电气工程师)一起负责评价器件特性和决定规格等的应用研究，罗玻兹负责硅单晶生长工作，诺伊斯和拉斯负责光刻技术工作，穆阿和霍尼负责扩散工艺工作，克莱那则负责公司的全面管理工作。他们都为新成立的公司而积极努力工作着。

费尔柴耳德公司的最初产品是以台面工艺为基础的基极扩散晶体管。与过去的控制基区厚度困难的晶体管制造工艺比较，用扩散法控制基区厚度比较容易而且很准确，这种工艺很快得到了效益。在半导体中扩散的杂质深度是由温度、蒸汽压和时间决定的。因此，可以准确地决定比以前的方法正确数十倍的基区厚度。扩散法的另一个优点虽然当时还不清楚，但扩散法非常适合于晶体管的分批处理工艺。

1958年利用扩散法制造的最初器件是台面晶体管。因为这种晶体管芯片断面具有顶部的平台形状从而被命名为台面晶体管。

这种晶体管的工作频率很高，当时可以达到GHz级水平，并且从结构上来看，散热特性很好。1959年人们认为这种台面结构很可能是晶体管的最终形状，然而，费尔柴耳德半导体公司开发出的平面工艺又引起了晶体管产业界的注目。

平面工艺也是扩散和掩模工艺为基础的工艺技术，比台面工艺有了进一步的改善。当时台面晶体管已批量生产，而且市场情况也很好，但是，它比平面器件脆弱，而且容易受表面污染。费尔柴耳德公司注意到了表面污染问题，并寻找了晶体管的钝化方法。当时二氧化硅(SiO_2)作为扩散工艺中的一般掩膜使用，但不能作为钝化膜使用，这是因为SiO_2中的杂质随时间向SiO_2中进行扩散，到达PN结区而引起不良效果的缘故。可是，当在SiO_2中掺入某种杂质时，则可变成有效的钝化膜。发现这种现象的是获得两个博士学位的费尔柴耳德公司的物理学家霍尼。

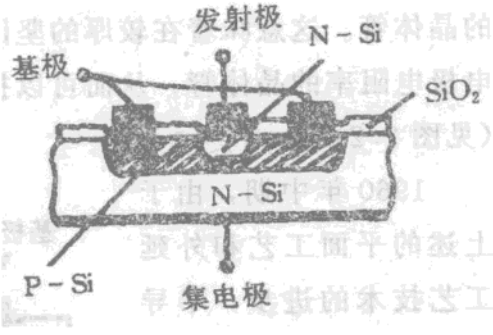


图 2.2-6　Si平面型晶体管

半导体表面钝化是平面工艺的一大优点。用氧化物包住晶体管时，纤细的PN结变强而形成牢固和可靠性高的器件，并且霍尼的这种工艺还有一个重要的优点，顾名思义，平面工艺是平坦的。霍尼做法是不在集电极衬底上形成台面基极层，而是在集电极下方进行扩散而形成基极的。这种工艺不仅消除了结构上的纤细性，而且利用氧化物上蒸发的金属膜可做成三个电极的引线，也就是不需要手工联结三个电极引线这样麻烦的工作。

费尔柴耳德公司的这个新工艺，在一年之内转移到生产线上，但却保持了几年的秘密，一直到1960年，平面工艺从一开始非常

成功，可是它也有一个缺点，即由于集电极材料的电阻高而不能制造出功率晶体管。然而，这个问题也很快得到了解决。

1960年6月，贝尔研究所发表了新的晶体管制造法，即外延法、外延层的电阻率和衬底材料的电阻率可以做的不一样。因此，使用这种外延工艺时，可以制备与衬底材料无关的，在外延层内的晶体管。这意味着在较厚的坚固衬底上可以形成薄基区和低集电极电阻率的晶体管，从而可以提高它的高频特性和大功率特性（见图2.2-7）。

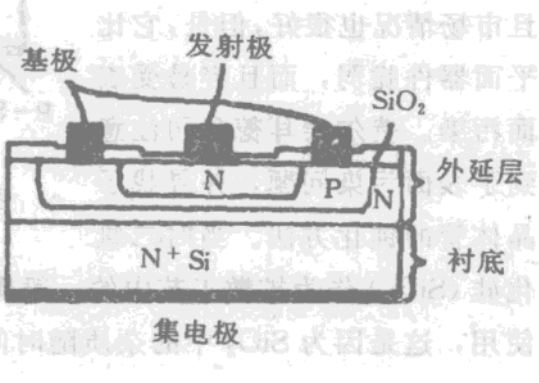


图2.2-7 外延平面型晶体管

1960年中期，由于上述的平面工艺和外延工艺技术的进步，半导体产业发展得很快，第一次出现了产品供过于求的现象，这并不是说应用面少，而是器件生产量比用户的使用量多的缘故。电子设备的组装是需要劳力和时间的工作，当时在计算机中使用的开关器件绝对数已增大到天文学的数字。比如说，1960年CDC公司的CD1604计算机是由约10万个二极管和2.5万个晶体管构成的，虽然有半导体器件，但当时还没有加快组装的手段，这样就产生了集成电路的必要性。

第三章　集成电路的出现

3.1　集成电路的研究

在一个半导体片中形成全电路的必要性来得太快了。1959 年当时的克尔比（Kilby）和诺伊斯都没有想过集成电路，当然其他人也没有想到。台面型和平面型晶体管都可以批量处理，一片衬底上的多数晶体管可以同时进行扩散和腐蚀，然后切成单个晶体管芯片进行封装，为了形成以后的电路，再把它们联结起来。这种麻烦的工作，当时很多研究工作者都感到不方便了，然而，当时还没有解决的办法。

集成电路（IC）是由两个人分别发明的，这两个科学工作者是 TI 公司的克尔比和费尔柴耳德公司的诺伊斯。克尔比是 1947 年开始研究电子学的，他非常喜欢发明创造，并迷上了贝尔研究所的晶体管，1952 年在参加贝尔研究所对专利使用公司进行的报告会议之后，他便开始研究晶体管电子学，得到专利使用权公司之一的先特拉布（Centralab）就是他工作的公司。他在该公司负责助听器的开发研究工作，为此，该公司设置了小型锗晶体管生产线，但由于资金的不足，1958 年 5 月克尔比转到了 TI 公司。在 TI 公司工作不久他就酝酿着集成电路的想法，他已经知道使用半导体材料容易制造电阻、电容和晶体管。电阻的制作是利用半导体体单晶材料的电阻性质，电容是利用反偏压时的 PN 结来实现的。他的下一个目标是研究怎样在一个硅片上做成这些器件的联结问题。

TI 公司的领导当时非常重视克尔比的想法，并要求他论证这种集成电路的可行性。他首先做了分立半导体元件的电路，最初

做的是全部使用半导体器件而把它们相互联结形成的触发电路。1958 年 10 月初他开始设计了锗单片触发电路，即在一个锗单片上做成体单晶电阻、PN 结电容和台面晶体管而形成的触发电路。利用 TI 公司的光刻技术，他在 1959 年初成功地制作了固体电路，即集成电路，于是 1959 年 3 月在 IRE 展览会上公开发表了被 TI 公司副董事长秀巴特（Shepherd）称赞为从硅晶体管发明以来 TI 公司进行的最重要的开发成果。

在报纸上广泛报导这个消息后，这一成果受到了意外的怀疑。当然，很多批评是对的，比如集成时受限制的因素有：电路的每个元件性能不能做到最佳状态；由于器件相互之间的配线，电路的制备更难；每个器件的成品率相乘时，集成电路的成品率只能达到 10%多一点；集成电路的设计成本很高而且改变电路设计很难等问题。但是，上述的集成电路的各种缺点，都由其他半导体企业的工艺技术一个个地解决了。

费尔柴耳德半导体研究开发部部长诺伊斯，当时正在探讨一年前霍尼开发的平面晶体管的可行性。1959 年 1 月他在自己的笔记本上写了如下内容：在半导体中用扩散法或淀积法可以形成电阻；根据反偏压 PN 结可以分离器件；半导体表面蒸发金属并通过氧化物中的电极孔，把这些元器件可以相互联结起来等。

经过一个月后，当诺伊斯听到 TI 公司的集成电路公报之时，费尔柴耳德公司马上召开了会议。在会上诺伊斯头一次向同行们叙述了自己的想法，即在 1 个芯片上可以形成复数个半导体元件的可行性。从此，费尔柴耳德公司开始了集成电路的开发研究，工艺工作人员和光刻专家们紧密组织起来，开始了在硅片上进行扩散电阻和晶体管之间的相互配线等的研究工作。

自从克尔比和诺伊斯打下集成电路的基础之后，从 1959 年开始集中力量进行了集成电路的研制工作。费尔柴耳德公司从斯佩

利（Sperry）公司召来了电阻-晶体管逻辑（RTL）电路设计专家诺曼，因为RTL正是费尔柴耳德公司建立集成电路微逻辑生产线时选择的集成电路。到1960年2月为止，在费尔柴耳德公司大量进行了微逻辑系列集成电路的寿命测试。

另外，TI公司采用了诺伊斯的蒸发金属相互布线的技术，1960年3月发表了军用特制电路的最初集成电路。到1961年末TI公司和费尔柴耳德公司都已批量生产了集成电路：TI公司批量生产5I逻辑集成电路系列，费尔柴耳德公司则批量生产微逻辑集成电路。1961年10月TI公司发表了装有数百位半导体存储器的小型计算机，并做出了$5I^2$系列逻辑集成电路，这是利用PN结分离半导体器件和蒸发金属方法相互布线的集成电路产品。

1962年只销售数千个集成电路，但从这一年却开始大量生产集成电路。TI公司设计和制造了22种军用特殊集成电路，费尔柴耳德公司也开始大量生产民用和军用集成电路。初期集成电路的价格很贵，当时1个简单的集成电路价格约为100美元。标准的晶体管-晶体管逻辑电路(TTL)是根据不同地方的研究作为基础而发展起来的集成电路（见图2.3-1）。

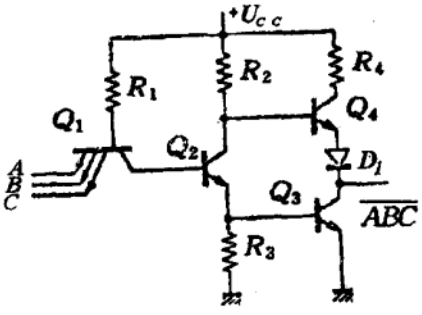


图2.3-1　标准型晶体管-晶体管逻辑电路(TTL)

1960年的逻辑集成电路是以晶体管之间的耦合为基础，使用了各种技术，但发现这里也有一些问题。比如说，二极管耦合逻辑集成电路或直接耦合逻辑集成电路的成品率是根据工艺的变动急剧下降的，电阻和电容结合只能得到低工作速度。称为帕西费克（Pacific）半导体的小公司的集成电路设计者布伊（Buie），在

1961 年发明了用耦合晶体管分离各分段的很好的耦合技术。布伊的晶体管耦合晶体管逻辑(TCTL)集成电路的优点关键是耦合晶体管之间具有很大的元件参数偏差也无关紧要。因此，可以提高逻辑集成电路的成品率。

1963 年希尔巴尼亚(Sylvania)公司向市场出售了称为 SUHL 的 TTL 集成电路系列产品。由于它是最初市售的一种集成电路，所以获得了用户的欢迎，很多其他厂家也开始生产完全模仿这种集成电路的产品。由于出现这种二手厂家，于是在市场上发现了不少冒牌产品，为了控制这种局面，还专门成立了产品供销企业。

3.2 MOSFET 的实现

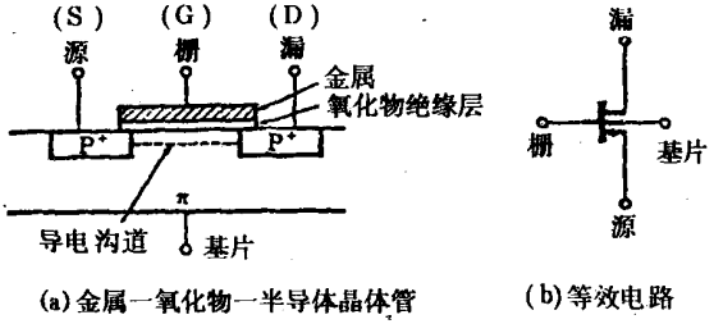
正在研究开发 PN 结的双极集成电路时，有一部分科学实验者却为实现场效应晶体管 (FET) 而进行了不懈的努力。因为这种器件的想法，如前面所介绍的，远比晶体管早。固体放大器的最初想法就是场效应晶体管。随着晶体管制造工艺的发展，1958 年通用电气公司法国分公司 CFTH 中的波兰科学家戴士南(Teszner) 做出了最初的结型场效应晶体管 (JFET)，当时称为戴士南晶体管 (Technetron) 的这种场效应晶体管是锗合金结器件，工作频率达到了 MHz 级。在戴士南晶体管出现以前，美国很多研究所也对场效应晶体管实现的可能性进行了研究。研究工作者们认为 FET 至少具有低功耗、结构简单的两个特点。

RCA 研究所的沃尔马克 (Wallmark) 对场效应器件进行了研究，并于 1957 年得到了专利。他的想法是 FET 不仅可作为分立器件看待，而且还可作计算机用逻辑电路网中集成很多个 FET 器件之用。两年之后，由 RCA 研究所的研究工作者韦末 (Weimer) 实现了沃尔马克的想法。

1959 年韦末成功地实现了硫化镉薄膜场效应晶体管。同一个

时期，贝尔研究所的科学家阿它拉（Atalla）利用半导体硅和 SiO_2 绝缘体进行了绝缘栅场效应晶体管的研制工作。接着 1959 年青年技术工作者霍夫森（Hofstein）进入 RCA 公司工作，他被分配到 RCA 电子研究所集成电子学小组，和另一个年青技术工作者海曼（Heiman）共同开始了研究工作，他们的目的是制造数千个晶体管电路所必要的硅绝缘栅场效应晶体管，1962 年他们达到了目的。

这种器件的结构与当时已产品化而生产的结型场效应晶体管大不相同，结型场效应晶体管是为了控制半导体中电流的有效断面积而利用施加反偏压的 PN 结耗尽层。霍夫森和海曼则注意到费尔柴耳德公司的平面工艺，替代反偏压 PN 结，使用 SiO_2 层而做成了绝缘金属栅。这个与硅绝缘的金属栅可以控制硅表面的扩散源区和另一方的扩散漏区之间的电流（见图 2.3-2）。



(a) 金属—氧化物—半导体晶体管　　(b) 等效电路

图 2.3-2　金属-氧化物-半导体晶体管

他们把所发现的金属-氧化物-半导体(MOS)结构的场效应晶体管缩写成 MOSFET，它不仅利用表面电荷的耗尽层电流，对漏区还可以在栅极施加正向偏压。因此，增加半导体表面附近的电荷从而可以加大电流。在结型场效应晶体管的栅极中是不能施加正向偏压的，因而不可能加大电流。他们认为这种新结构的 MOSFET 是制造集成电路的最佳半导体器件。1962 年下半年，在 1.6mm² 面积的芯片中做出了 16 个 MOSFET 而形成的多用逻辑

单元，这就证明了他俩的主张是对的。

到1963年，RCA公司制作了具有数百个MOS器件的大阵列集成电路。然而，当时的这些集成电路也有缺点。首先是它们对静电电荷非常弱，电压稍微超过一点，很薄的SiO_2层被破坏，瞬间MOS器件就损坏了；其次是MOS器件的工作电压比当时的双极逻辑电路的高很多；再次是MOSFET的工作速度比双极电路低很多。

MOSFET虽然完成了重要开发先驱的作用，但是，在商业基础上遇到了问题。MOSFET的优点是：首先思路是清楚的，即比双极电路工艺简单得多；其次是功耗小，而且比双极器件集成度高；再次是生产成本低。但是，在实际生产中却遇到了困难，主要是上述的氧化膜缺陷及其他的一些困难。因此，几乎没有一个企业坚持生产MOS集成电路，1962年进行MOS器件研究工作的费尔柴耳德半导体公司，经历重重困难，对这个工艺进行鉴定之后，把主要力量转移到双极晶体管电路的生产中去了。为了解决MOSFET的诸多问题而花费很多时间的RCA公司也在20世纪60年代初，把开发研究的主力转移到能捞钱的双极电路的生产方面。

在这个时期，离开费尔柴耳德公司的波布(Bobb)、诺曼、费加森（Ferguson）三人和曾当过海军士官的洛维尔(Lowell）创立的通用微电子公司，

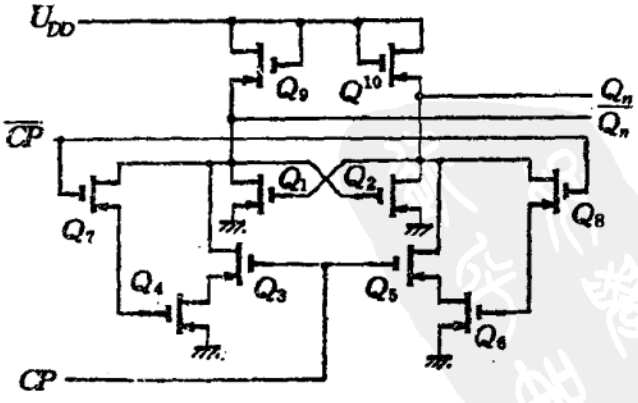


图 2.3-3 二进制计数器

看清了MOS集成电路的前途，集中力量进行进一步的研究。该公司的主要关系厂商之一的维克多计算机仪表公司，在1964年发表了当时的最新计划，在这个计划中将要生产只用29个MOS芯片构成的廉价台式计算机，原来的台式计算机中则使用了2.1万个分立器件。然而，在1965年和1966年之间，通用微电子公司正在为MOS器件的生产成品率上不去而发愁。

到了1965年中期，只有通用微电子和通用仪器两个公司坚持生产MOS集成电路，他们对这个新产品是很关心的。到了1969年，年生产额从1 500万美元提高到3 500万美元，勉强开始了起步。到1970年末产品总销售额达到了1亿美元，比预期发展得快一些。

3.3　集成电路工艺的进一步发展

生产工艺的进步，使半导体企业的地位提高了，电子束掩膜制造技术是半导体工艺中的一大革新。由于使用非常微细的电子束直接描绘原尺寸掩膜技术的出现，就好像把原来使用的庞大的高价光刻设备宣判死刑一样。

到1965年末为止，已经有25个公司以上的企业生产和出售集成电路，费尔柴耳德公司仍然占据半导体生产技术的领导地位。这一年的8月费尔柴耳德公司推出了双列直插式封装（DIP）管壳，以减少组装时间和降低成本为目的设计的DIP管壳，很快被其他很多公司采纳了。

接着费尔柴耳德公司开始着手研究了线性集成电路，该公司设计者之一的韦德拉（Widlar）对线性集成电路有了一个好想法，他把电路中的其他部件，尽量使用晶体管代替，比如，高电阻必须用晶体管代替。韦德拉开发出最初的实用集成电路运算放大器，接着设计了高阻抗运算放大器、最初的比较器、最初的标准型低

成本的补偿型运算放大器等产品。

1966 年国际半导体公司出售了最初的商用耿氏二极管而开辟了固体微波电路的道路，这时雪崩二极管和微波晶体管也普及化了，同时半导体分立器件逐步使用低价格的塑料管壳，因此，产品价格急剧下跌。

1966 年，人们生产绝缘衬底材料开始对蓝宝石感兴趣了，从而指出了 SOS（Silicon on Sapphire）电路的高集成度和低功耗的可行性。1966 年在 MIT 中最早纳入了显示器文字发生器中的 6 144 个二极管矩阵变换电路的 SOS 芯片。

1967 年初出现了检索表，比如三角函数表或显示器文字发生器等当中使用的只读存储器 ROM 等。费尔柴耳德公司开始出售了 4 位×16 字码构成的 64 位 MOS 存储器，一年之后该公司发表了 1 024 位的 ROM。

20 世纪 60 年代末半导体企业迅速发展起来了，各厂家可以购入直径为 3.8～5.1cm 衬底片的处理设备，并计划交换直径更大的 7.6cm 衬底片的处理设备。20 世纪 60 年代中期开发的发光二极管开始使用于逐渐大型化的数字显示设备中，线性集成电路企业差不多每周发表新产品，国际半导体公司做成了双极晶体管和场效应晶体管混合的世界上最初的高输入阻抗的运算放大器 LF156 产品。

随着半导体产业的发展，半导体企业也增加了。1967 年以前，美国硅谷中只有 3 个芯片厂家。但 1968 年增加到 13 个企业，1969 年又增加了 8 个公司，硅谷以外地方也成立了半导体企业。1969 年从 TI 公司退职的人们在多拉斯成立了莫斯第克（Mostek）公司。

从 20 世纪 70 年代初到中期是工艺竞争和实验的时代。随着集成电路密度的提高和器件尺寸的变小，超净室的洁净度要求越

来越高了，离子注入法逐渐取代了扩散法。离子注入法是20世纪60年代中期出现并在以后的10年间进入生产线的，使用离子注入法时，容易进行高密度存储器的生产，这个方法比扩散法更大幅度地改变掺杂浓度，而且更正确地控制杂质浓度。莫斯第克公司利用离子注入法，最初生产了MK4006动态随机存储器DRAM。

MOS器件的厂家使用N沟道工艺，大幅度地改善了MOS器件的工作速度。当然，NMOS的掺杂控制比PMOS难得多。但是，需要改善工作速度是很明显的，这是因为N沟道中的载流子电子的迁移率比P沟道的载流子空穴大的缘故。

I^2L（Integrated injection logic）是双极器件厂家高技术的产物，这个产品是德国的IBM和荷兰的菲力蒲公司各自独立发明的，利用这种技术可以实现具有MOS电路密度和双极电路速度的产品。1972年发表这个产品之后，各双极电路器件厂家积极进行了各种新产品的生产。然而，I^2L器件被MOS器件的攻势压倒，它只占领了市场的一小部分。

1972年国际公司的技术工作者们开发出被称为可擦可编只读存储器的EPROM，在这个存储器中使用浮动栅型雪崩注入存储器单元。这种存储器单元具有引人注目的特性，也就是利用氧化物旁边设置的PN结雪崩击穿时，向埋入氧化物中的栅极输送电荷来进行数据的写入。另外，在单元中照射紫外线方法擦去EPROM中的数据。因此，可以多次读出数据，而且数据保持时间可达到几年。最初的这种器件作为可变微处理程序存储器，很快引起了人们的重视。经过一年的改进，容量提高了将近一倍。

几乎在同一个时期出现了新的半导体存储器。1970年贝尔研究所的玻伊耳（Boyle）和史密斯（Smith）开发出电荷耦合器件CCD，并且，以CCD为基础的电荷耦合原理非常简单。载流子是

在产生耗尽层电极下面的反型区中存储起来的，并根据电极上施加适当的脉冲电压，载流子从一个电极下面转移到另一个电极下面。CCD 结构比任何其他随机存储器 RAM 都具有非常高的存储器密度。从 CCD 的芯片尺寸和价格来看，在 3 个晶体管单元的 RAM 产品的三分之一以下。CCD 主要作为电视、摄像机中的模拟滤波单元使用，因此，市场有限。

CMOS(Complementary MOS)称为互补金属-氧化物-半导体晶体管。开始时虽然是作为钟表用芯片，以低速、低密度的金属栅工艺开发的，但后来引入尺寸缩小、氧化物分离、Si 栅等新工艺之后，发展到了与 NMOS 相匹敌的速度和集成密度的器件，并且，与 NMOS 不同，待机时的功耗只有数 μW。

到 20 世纪 70 年代末为止，半导体产品销售额已达到 60 亿美元。已经做出了 64K RAM。这说明 80 年代将是超大规模集成电路的时代。

第四章　超大规模集成电路

4.1　集成电路的分类

集成电路根据其集成的结构可分为单片集成电路（半导体集成电路）、薄膜集成电路和两者并用的混合集成电路。单片集成电路又可根据其基本单元的晶体管种类分为 MOS 晶体管集成电路和 PN 结型双极晶体管集成电路。根据电路结构，集成电路分为电压电平对应于 0 和 1 的二进制数字电路和放大器等的模拟电路。MOS 晶体管数字电路有 NMOS、CMOS 等，双极晶体管数字电路有 ECL、STTL 等集成电路。这里 NMOS 为 N 沟道金属—氧化物—半导体场效应晶体管，CMOS 为互补 MOS，ECL 为发射极耦合

逻辑电路，STTL 为肖特基晶体管-晶体管逻辑电路。

根据集成度，集成电路一般分为：集成度为 100 以下的小规模集成电路（SSI）；集成度为 100 到 1 000 的中规模集成电路（MSI）；集成度为 1 000 到 10 万的大规模集成电路（LSI）和集成度超过 10 万的超大规模集成电路（VLSI）。20 世纪 70 年代末制备的 64K 位存储器，只能说到了超大规模集成电路的门坎。从 256K 位存储器起才算是超大规模集成电路，因此说，进入 20 世纪 80 年代后开始了超大规模集成电路的时代。在 20 世纪 80 年代集成电路的集成度几乎以每两年翻 4 倍的速度急剧发展，即 256K 位、1M 位、4M 位、16M 位、64M 位、256M 位，到了 1996 年已提高到 1G 位的集成度，这里 K 为 10^3、M 为 10^6、G 为 10^9 的数量级。目前在一个半导体 Si 芯片中能够做出数十个亿以上的元器件。

这些超大规模集成电路一般指的是单片集成电路，而且大部分是计算机中应用的半导体存储器。按功能的不同，MOS 存储器可分为停电时丢失数据的随机存储器（RAM）和保存数据的只读存储器（ROM）等，其中随机存储器又可分为静态随机存储器（SRAM）和动态随机存储器（DRAM）。

ROM 中有根据用户要求在工厂直接生产的 MROM，由用户编写一次性程序的 OTPROM，由用户多次写入的可擦可编程而且用紫外线擦洗的 EPROM，用电可擦的 E^2PROM，利用 EPROM 和 E^2PROM 的优点而开发出的 Flash ROM 等。一般停电时仍保存数据的存储器统称为 NVM（Non Valatile Memory）。

MROM 和 E^2PROM 只用 5 伏电源就可以工作，相反，EPROM 和 Flash ROM 则需要 5 伏和 12 伏电源，这是它们的缺点。在集成度方面，由 1 个晶体管单元构成的 MROM 的集成度最高，而由 2 个晶体管单元构成的 E^2PROM 则低；从多次进行程序

的信息数据来看 EPROM 和 Flash ROM 的特性最好；集成度最高的 MROM 具有处理指令时间最短的特点。

最初的 SRAM 单元是由 6 个晶体管构成的，但现在的 SRAM 则由 4 个晶体管和 2 个电阻构成 1 个单元。以前 DRAM 的单元是由 3 个晶体管构成的，但是，现在的 DRAM 单元是由 1 个晶体管和 1 个电容构成的。

下面分析 SRAM 和 DRAM 的区别。前面已说过，静态随机存储器的单元是由 4 个晶体管和 2 个电阻构成的，而动态随机存储器的单元则由 1 个 MOS 晶体管和 1 个 MOS 电容构成。动态随机存储器的集成度比静态随机存储器一般高 4 倍以上。静态随机存储器单元中的 4 个晶体管组成一个双稳态触发器，因此，只要保持正常的电源电压，所存入的信息就可以一直保存下去。在动态随机存储器中，电容的电荷决定信息，因此，为了维持数据需要进行刷新，即动态随机存储器中所存储的信息每隔一段时间，例如数毫秒，就需要重新写一次。但是，对静态随机存储器就不需要进行刷新，因此，操作相当简单。

最近又出现 DRAM 和 SRAM 两者优点合为一体的伪 RAM (Pseudo RAM)。伪 RAM 是采用提高集成度的 DRAM 结构和工作速度快的 SRAM 动作原理，即伪 RAM 的集成度比 SRAM 的高，工作速度比 DRAM 的快。然而，由于改善 DRAM 的控制电路之后，大幅度提高了工作速度，所以，现在不怎么使用伪 RAM。为了提高 RAM 的集成度和工作速度以及降低价格，最近出现了多种功能的特种存储器。

4.2 特种存储器

从最近的个人计算机（PC）或工作中心站（W/C）的动向来看，不仅在主存储器方面，也在图形存储器方面有相当快的发展，

从而不断产生新的特种存储器。这些特种存储器有：扩展数据输出的 DRAM（EDODRAM）；窗口 RAM（WRAM）；同步 DRAM（SDRAM）；同步图形 RAM（SGRAM）；超高速缓冲 DRAM（CDRAM）；同步图象 RAM（SVRAM）；三重端口 DRAM（TPDRAM）；积成画面缓冲器（IFB）；增强型 DRAM；RAMBUS DRAM；RAMLINK；MOSYS（MOST）；图象 RAM（VRAM）等产品。这些产品大部分是由高频带总线形成的。也就是说，使中央处理机（CPU）更快地处理和传送存储器数据。这些产品的出台背景是由于现有的标准 DRAM 或图形存储器不仅价格高而且工作速度也较慢，虽然 CPU 的处理数据速度明显提高了，但存储器的工作速度相对较慢而影响计算机的工作速度，为了改善这些缺点及降低价格而提出了这些特种存储器。

目前正在加速高频带 PC 的成长率，多媒体用计算机的集成化等是 PC 的最大发展趋势。随着 PC 市场的加速扩大而大幅度增加 100MHz 以上系统的 PC，比如，PENTIUM PC 等。为了支援这种计算机的发展，出现了过程控制接口（PCI）等高性能总线。另外，在 PC 中逐渐扩展三维图形处理、MPEG 译码、编码（CDG）等的多媒体功能。在工作站中则比 PC 更早地普遍使用了三维图形处理技术。

目前 PC 图形技术的发展趋势是形成独立系统，而今后的发展趋势是具有多媒体功能的压缩数据系统。数据总线目前为 32 到 64 节线，今后可能达到 64 到 128 节线。存储器容量目前约为 2M 到 4M 字节，将来可能增加到 4M 到 6M 字节，目前台式 PC 的市场规模 1995 年是 4 100 万台，1996 年估计达到 4 500 万台，1998 年预计达到 5 500 万台。下面简单介绍上述的特种存储器。

1. 扩展数据输出的动态随机存储器（EDODRAM）

最近随着计算机系统性能的提高，要求更快速的存储器。对

静态随机存储器(SRAM)开发出同步成组静态随机存储器(Synchronous Burst SRAM)等的高性能SRAM，从而在一定程度上满足了CPU的快速步调。但对DRAM来说，由于其本身特性的限制，很难期待与SRAM相匹敌的工作速度。为了解决这个问题，利用现有的像快页模式(Fast Page Mode)或静态列模式(Static Colum Mode)那样的特种模式，在一定程度上提高了带宽，可是它们已达到了临界状态。因此，自从开发出称为EDO的改进页模式之后，DRAM的性能急剧提高了。

如上所述，EDODRAM是在现有的快页模式中调整特定功能而简化页面周期的DRAM的一种特殊模式，因此，为了理解EDO模式，首先要充分理解快页模式。快页模式是根据行地址启动的列中，由列地址选择(CAS)只交换列地址而进行快速存取数据的方法，即在RAS中触发而输入的行地址是把该行地址中的所有列都触发之后，根据CAS和列地址输出特定数据的方法。

EDODRAM比快页模式提高最大带宽60%(从25MHz提高到40MHz)，但对此的加价只有5%，我们预计今后很多方面都可以用EDODRAM代替快页模式。

2. 图象随机存储器(VRAM)

由于图形显示装置(CRT)的析像清晰度和彩色层次的增加，画面缓冲器的画面刷新带宽(每秒在画面显示的数据)将增加而产生子系统的瓶颈现象。

一般用1个输入输出数据线的单端口字节宽DRAM构成画面缓冲器时，画面缓冲器动作的大部分时间消耗在画面的刷新上。在刷新画面期间，由于不能用画面缓冲器进行图形数据处理，因此，快速处理图形数据很困难。为了解决这些问题，开发出了一个端口进行图形数据处理、另一个端口则刷新画面的双端口存储器的图象随机存储器。

除了DRAM端口和串行模拟存储器(SAM)端口是互相复制数据的传输动作以外，还进行异同步动作，所以可以同时进行图形数据处理和画面刷新动作。在VRAM的DRAM端口中，除了标准DRAM所有功能以外，还附加了为快速处理图形数据而同时写入多个数据的成组写入功能和写入刷新等功能。在SAM端口中的数据输入输出是与系统时钟同步的，由于其动作速度等于目前的50MHz的高速度动作，因此，充分满足了画面刷新带宽的要求。

3. 窗口随机存储器（WRAM）

目前，在伴随GUI环境的大部分台式或手提式计算机系统中，要显示子系统形成总系统性能的带宽，但是，VRAM的价格比标准DRAM高，因此，在形成高性能图形子系统中受到限制。为了解决这些问题，就要设计既有进行图象RAM的功能，又要把存储器体系结构设计成符合于窗口基础用户接口(GUI)环境，这就需要开发出接近于DRAM价格的新型图象存储器。

窗口RAM由256K×32RAM和128×16SAM构成，基本功能类似于DRAM。WRAM具有1 024×1 024×256彩色的画面缓冲器，在存储器中使用内总线（256）而带宽扩大到1.6GB/s，并通过内部操作实现快速填充、文本移动、卷动、成组移动等功能，大部分完成现有窗口加速功能，缩小系统的总附加信息而改善图形性能。

4. 集成画面缓冲器（IFB）

这是对构成图形子系统的控制器等部件及画面缓冲器等进行单片集成化而企图缩小部件占有面积，提高性能和降低价格为目的的集成电路。也就是说，对图形子系统的控制器和画面缓冲器进行集成化，可以解决控制器和画面缓冲器之间接口的带宽极限的数据总线宽增大和提高数据总线频率，减少数据总线的外部加

感而达到最小的电流消耗，另外，降低对个别部件的价格和复杂的印刷电路板（PCB）设计带来的成本上升。利用DRAM工艺减少控制器布局面积，追加内部接口电路来解决由填充数限制而带来的芯片面积极限。通过单片集成化将减少封装成本及PCB路径选择而降低产品价格。目前所有系统都在向轻、薄、小型化方向发展。在需要开发出专用集成电路的情况下，制备出IFB是恰当的。

5. 同步动态随机存储器（Synchronous DRAM）

目前标准DRAM的工作速度跟不上CPU速度的提高。虽然对DRAM的绝对速度的提高人们无可奈何，但在实际系统中缩小主要使用的快页模式周期时间，并增加带宽而提高系统的性能还是可行的。

现有的DRAM只根据DRAM控制器中形成的行地址选择(RAS)、CAS、字单元（WE）等信号进行控制，也就是指定X地址时，根据Y地址只可读出或写出1位数据。但是同步DRAM是系统时钟直接输入到系统的内部，因此，把RAS、CAS、WE等的控制信号等都与系统时钟同步进行工作的DRAM称为SDRAM，将来SDRAM可代替现在的DRAM，SDRAM的工作速度为10μs（100MHz）。

6. 同步图形随机存储器（SGRAM）

为了解决作为图形存储器主要使用的VRAM的高价格问题，人们想用高带宽DRAM代替图形存储器。SGRAM是在SDRAM现有功能的基础上附加了成组写入的图形功能，存储器密度为8M位（256K×32），最高工作频率为80MHz。

与SDRAM相同，SGRAM是与系统时钟同步工作的，是成组模式存储器，也就是说，具有写入时忽略3位Y地址，8位成组写入的功能。SGRAM的×32产品，一次可以写入8×32=256

位。

7. 超高速缓冲动态随机存储器（Cached DRAM）

这种存储器的开发背景是，在存储器分级结构上把CDRAM（主要是SRAM）和主存储器（主要是大容量的DRAM）形成单片集成化，以改善平均存取数据时间为目的而开发的存储器。

这种存储器在结构上由大容量DRAM端口和小容量SRAM部分及它们中间的数据传送缓冲器组成，数据传送缓冲器提供宽内总线（一般为128位）。DRAM的读、写操作始终通过数据传送缓冲器进行，但SRAM部分是独立进行操作的，虽然是单端口，但从DRAM向SRAM的总线宽为128位，因此，具有DRAM部分和SRAM部分之间相互传送数据能力非常好的优点。DRAM的动作类似于SRAM的动作，由数据传送缓冲器和SRAM存取时间决定芯片的存取时间，所以，可以提供比现有VRAM快的10μs（100MHz）存取时间。由于整个芯片与系统时钟同步，所以可以防止现有DRAM那样的由控制器引起的速度损失，另外，还具有异同步的输出控制插针，更容易进行系统的输出控制。

8. 三重端口动态随机存储器（Triple Port DRAM）

在VRAM中由于是1个SAM端口，当进行串行读出（或串行写入）时，不能进行串行写入（或串行读出）。只有结束串行读出（或串行写入）之后才能进行串行写入（或串行读出），为了进行同时独立进行串行读出和串行写入，由此开发出了具有两个SAM端口而实现高带宽网络和高速系统总线的三重端口动态随机存储器。

TPDRAM的所有功能与VRAM相似，并在两个方面具有附加功能。第一，具有对不同端口可以同时进行串行读出和串行写入功能；但是，在RAS的1个周期中不允许同时读出传送和写入传送。第二，在TPDRAM中由于具有屏蔽位寄存器，在进行读出

传送和写入传送时，以位单位进行传送屏蔽，因此，只对屏蔽SAM列仍然维持SAM深度。

9. RAMBUS DRAM（RDRAM）

由于在DRAM性能比CPU性能差而实现存储器系统时，需要利用复杂和费用高的SRAM超高速缓冲存储器和DRAM的分层存储器系统，另外，在图形存储器中，为了高清晰度的图形系统而需要高CRT显示带宽，因此，代替速度慢的DRAM，只好使用高速VRAM那样的高价帧缓冲器。

为了解决上述的系统复杂化和价格问题，要求开发出高速度且价格适当的存储器，因此，RAMBUS公司提出了每秒500M字节数据传送可能的RAMBUS系统。这种RDRAM是由进行小电压摆动，并由高质量传送端接线构成的芯片对芯片总线的RAMBUS频道、传输线和为CPU或DRAM接口的RAMBUS接口及DRAM芯片组成的。

10. 同步图象随机存储器（SVRAM）

它是在VRAM具有的图形处理功能中附加高性能同步功能和同步逻辑等优点的高终端图形系统的存储器。由于VRAM和同步接口相结合，预计在图形中可显示出很好的性能，并可在高终端图形系统中使用，但由于是双端口，芯片尺寸增大，价格不会很低。

11. 增强性DRAM（Enhanced DRAM）

只使用最小限度的单片快速SRAM，芯片尺寸的增加最小。采用快速DRAM工艺和高速线路设计，不仅可加快数据的总处理能力，也附加了等待时间的产品。由于DRAM和SRAM之间的宽数据通路，使快速存取时间成为可能，并使预负载时间和数据输运相一致从而改善其速度。

12. 随机存储器环（RAMLINK）

随机存储器环是在各自的DRAM中，循环所谓的托肯（Token）信息包来进行业务处理的。目前以主处理机（HP）和小型计算机（Apple）等系统用户为中心展开工作，将来可能代替DRAM和SRAM的使用，它的集成度可达到16M位或64M位。

13. MOSYS（MOST）

这是为了缩小CPU和存储器之间的速度差而开发的一种存储器，与RAM、BUS、DRAM、RAMLINK、同步DRAM等都是高带宽存储器的一种。它基本上是多切换触排同步DRAM，芯片内是异步动作，外部是同步动作。内部切换触排大小为32K字节（256×32×32），根据集成度决定切换触排。比如，4M位时，存在16个存储单元，16M位时，存在64个存储单元。

4.3 专用集成电路（ASIC）

要了解专用集成电路的历史，首先要了解数字器件的开发历史。在1963年出现了成为基本数字器件的TTL电路，1967年出现了CMOS集成电路和门阵列电路，1983年出现了砷化镓门阵列电路。

1960年引入了第一代专用集成电路的门电路概念；从1960年到1970年间，作为第二代，引入程序库单元及计算机存取单元（CAD）的概念；第三代是从1970年到1980年间引入了逻辑模拟及自动记录结构（layout）的概念；第四代是从1980年到1990年间的专用集成电路事业最旺盛的时期，出现了CMOS门阵列电路及高性能抹除和写入系统电路（EWS）；然后到现在为止的第五代中引入了高密度、高速度、针状引线封装等高水平设计可能的甚高密度逻辑电路的概念。

下面介绍系统设计中的主要技术条件。用一句话来说，发展

趋势是轻、薄、简，其设计要求为高集成度、高性能、高操作速度、低功耗及高可靠性，以及为此而新引入的多种程序单元的设计系统和降低价格等。

那么，在系统项目中实现专用集成电路时会产生什么样的效果呢？第一，通过单片化，可以缩小系统板的空间。第二，降低系统设计费用，提高可靠性及系统功能的扩大。第三，通过上述条件可以缩小系统开发所需时间及降低制造价格。

下面分析专用集成电路的分类。集成电路分为两大类，即专用集成电路和通用集成电路。专用集成电路又可分为全定制、半定制和程序控制逻辑器件(PLD)等。半定制的专用集成电路中包括门阵列电路、标准单元电路及可编程逻辑电路（PLA）等。全定制专用集成电路是完全按用户的要求从头进行设计作业，半定制专用集成电路是在预先做好程序库的模型单元片上，由用户经过逻辑模拟等系列过程进行设计的。对制作过程进行比较时，门阵列电路、可编程逻辑电路、标准单元电路只进行选择阶段制作，而全定制则从头开始进行所有阶段制作。在这种专用集成电路制作中，主要的问题是采用使用方便的门电路，通过最先进设计技术的高集成工艺过程，稳定供给设计上所需的多种程序库及制作工艺所需要的物质，样品试制的早期开发体制等都是主要的性能指标。

下面对专用集成电路和通用集成电路进行比较。专用集成电路是专用的单一用户产品，另外，还可以说它是安全可靠的系统。对通用集成电路来说，它是为多用户而制造的，即用户很广泛，而且是自由系统。对开发周期进行分析时，门阵列电路的开发时间约为2～4周，标准单元电路的开发时间约为8～10周，生产时间为10～12周，总合起来计算，门阵列专用集成电路需要12～16周，标准单元专用集成电路需要18～22周。对通用集成电路来说，

开发时间约为 12～14 周，设计和生产时间约为 10～12 周，总合起来计算，则需要 22 周以上。

专用集成电路工艺规程有基本 MOS 结构、CMOS 倒相器结构、主控结构、程序库单元结构等。MOS 晶体管有 P 沟道和 N 沟道。在 P 沟道 MOS 的栅极中施加高电平，沟道就关闭，施加低电平，沟道就开通。对 N 沟道 MOS 来说，正好相反，栅极施加高电平，沟道就开通，而施加低电平沟道就关闭。

CMOS 倒相器是结构为 N 沟道 MOS 和 P 沟道 MOS 相结合而改善信息传输特性和电流特性的器件。在输入端输入高电平时，输出则变成低电平，相反，输入低电平时，输出则变成高电平，主控结构是由高电压部分和输入输出界面 I/O 接口组成的。

专用集成电路一般具有的程序库分为 Premitive、I/O、存储器、CPU、宏单元（MCELL）、模拟等部分。这里说的 Premitive 单元指的是电路结构的基本单元，而 I/O 单元为系统中与其他器件进行分界的单元，存储器单元有 ROM、RAM、数据（DL）通道、管道通道等，CPU 有 80C51、780、数据段指示器（DSP）、测量仪表控制系统（RICS）等，宏单元有保护接地（PG）底座类、数据多路转换设备（DME）、路径控制器（RTC）、阴极射线控制器（CRTC）等，逻辑单元有模拟数字转换器（ADC）、存取控制器（TAC）、运算（OP）放大器、比较器等。总而言之，可以想到的所有电路是由上述 6 种程序库构成的。

专用集成电路的生产程序是在程序和主单元完成之后，从用户中接受数据并进行设计的，样品设计后接受用户的正式批量生产的通知，并在规定日期内完成生产程序库的任务。

第五章 多媒体技术的发展

5.1 什么是多媒体技术

由于多媒体技术具有很广的范围，一句话下定义很困难。按英文字意分析是 MULTI 和 MEDIA 的意思，即 MULTI 是多或多重的含意，MEDIA 有狭义和广义媒体的含意。但一般传达信息的媒体称为 MEDIA，比如，报纸是传达新闻的媒体，收音机是传达声信息的媒体，计算机的硬盘也是传达数据的媒体等等。

我们从信号源的信息传送概念出发，说明音响、影像，图象、传真等的媒体，因此，简单说来，重叠处理多种信息源传送的技术称为多媒体技术。另外，应该说的是在多媒体技术中应包括最重要的相互作用，即拥有随时随地任意选择信息内容的相互关系，所有信息源必须数字化，这一点在后面叙述。

5.2 多媒体技术的发展过程

新科学技术的发展有两类：一类是随着技术的发展而自然发展的新技术；另一类是由市场需求而任意形成的新技术。多媒体技术的发展是属于后一类的新技术。由于到现在为止，多媒体的正确技术定义和英语的定义模糊不清，而且它又是市场需求的技术，所以它是以万能的技术出现的。

多媒体技术的出现是高分辨率电视（HDTV）技术竞争的产物。在东京奥运会之后，1986 年日本首先开始 HDTV 技术的研究，现在称为高级视觉（High Vision）技术，但当时称为 HDTV 或日本电台（NHK）的 HDTV 技术，是高级的图象电视技术。为了作为世界标准技术，日本提出了申请，在北美地区首先批准了

日本开发的 HDTV 技术的标准申请。

1986 年在国际无线电咨询委员会（CCIR）中提出了日本和美国的共同 HDTV 技术。日本还想在欧洲推广，但是以欧洲共同体为前提，他们想开发出自己独自的 HDTV 技术。第二年美国也开始提出自己独自的 HDTV 技术，他们的 HDTV 技术数字化方式与日本的不同。美国以独自 HDTV 技术作为目标，由国内各研究所提出了压缩数据的数字化方案，其核心为数据变换传送（DCT）技术。在全数字化方式的 HDTV 技术中，如果随着 CPU 的发展，能够进行这些数据的处理，那么可以在 PC 中容纳 HDTV 技术，因此提出了多媒体技术。

为了避免像日本那样的世界标准化的失败，美国一开始没有把 HDTV 技术作为对象，而是提出了多媒体这种名称的新技术。也就是在 PC 中以硬盘作为基础，进行声音、影像、图象等多种媒体的处理，即多媒体技术。这样，不管以前的 HDTV 技术标准化如何，美国还是向全世界提出了多媒体的新技术，在 1993 年决定采用美国式 HDTV 的动态图象（MPEG）技术。根据这种情况，日本虽然具有 High Vision，即模拟方式的 HDTV，但在 1993 年也决定了 MPEG 作为下一代 HDTV 技术投入了大量资金进行超级 TV（即 HDTV）中结合 MPEG 技术的研究工作。随着这种趋势，欧洲也决定研究 HDTV MPEG 技术。伴随着这种 HDTV 的市场技术主导权，从而出现了多媒体技术。

最初的多媒体技术是以 PC 为基础的，因此，出现了多媒体个人计算机（MPC），即 MULTIMEDIAPC 的意思。这样在 1989 年发表了水平 I(Level 1)的样品，1992 年发表了水平 2 的样品，1995 年发表了水平 3 的提案，但还未做出准确的样品，同时向国际标准化机构（ISO）提出静态图象（JPEG）、MPEGI、MPEG2 的技术标准化。1991 年完成了 JPEG 技术的最终标准化，1992 年完成

了 MPEGI 的标准化，1994 年底完成了 MPEG2 技术的标准化。

下面介绍多媒体个人计算机（MPC）。水平 I 中的 MPEG 1 之 PC 的 CPU 至少是以 286 的 10MHz 以上的，并安装硬磁盘（HDD）、软磁盘（FDD）以及 2M 字节左右的存储器为标准。很有意思的是在这里基本上都安装有激光盘 ROM（CDROM）。大家都知道，在多媒体信号处理中最困难的是图象数据处理，这一点在后面将详细说明。在多媒体信号处理中需要庞大的视频数据的处理，所以出现了 CDROM，另外，也需要音频的提供。在水平 2 中的 MPEG2 样品中，需要至少 386、20～25MHz 以上的 CPU，也需要硬盘和其他的软盘。系统中需要 4M～6M 字节以上的 RAM。当然 CDROM 是作为基本存储器使用的，声频的提供和水平 1 相同。已经发表的水平 3 的 MPEG 系统，它需要 75MHz 以上的 CPU。

在这里介绍一下数字化的优点。上面已经说过，在多媒体技术中需要数字化的数据处理。在信号变成数字化时，信号的存储、传送、保存都非常方便，并增加了表现性，同时当反复录制时，信号源的再现性很好，而且信号的加工、编辑都很容易进行，更重要的是数字化的数据可以实现相关性，并根据标准化，容易进行信号的单一化，具有随时从数据中寻找所需信息的优点。

最近电子产品的结构发生了变化。像 80 年代的激光唱机（CDP）那样，在音频方面，从模拟信号迅速变化成数字信号。进入 1990 年后开始推进视频信号的数字化过程，在视频信号的数字化中 MPEG 技术作为中心技术迅速发展。随着音频信号和视频信号的数字化，通讯本身也在 20 世纪 90 年代后急速变成数字化通讯。根据源信号、通讯线路及接口等的全数字化，所有技术不是单独存在的，而是形成综合的技术，电子计算机和通讯等形成所谓的多媒体一体化技术，比如说，在个别数字化电视机中，基本

的硬件结构要求高水平的计算机。这种数字 TV 是通过卫星广播进行传播或通过技术电话线或电缆传送信息的。从这种概念来看，这种数字 TV 是计算机、用户（Consumer）或者通讯等的技术融合在一起的产品。

如上所述，数字化信号比模拟信号具有很多优点，那么为什么这么晚才开始进行数字化工作呢？在信号的数字化中，最困难的是图象信号的数字化，就是说，在视频信号的数字化过程中，产生非常多的数字数据。举例说，如果 10 秒钟的标准 TV 的广播信号变成全数字化时，就产生约 200M 字节的数据。以前 PC 硬盘的容量为 100M 时，它只能收录 5 秒钟的 TV 广播信号，一部电影需要约 100 分钟的放映时间，很明显，这需要大量的硬盘，从根本上来说，这种硬盘不能存储这么多的数字化数据。再就是能否通过广播线路传送的问题。因此，最近出现加工数字信号的 MPEG 技术之后，数字化工作才开始急剧发展。在 MPEG 技术中最重要的是压缩数据的技术，即在 MPEG 技术中能压缩数据是它所应有的本领。根据 MPEG 技术的发展，现在可以把视频信号变成数字信号应用。

我们常使用的硬盘容量为 20～650M 字节。最近也出现了 2G 字节的硬盘。CDROM 具有 650M 字节的容量，另外磁光盘(MOD)则具有 300M 字节的容量。在比较它们的单价时，CDROM 的成本费约 2 美元，硬盘为数十至数百美元，MOD 为 200 美元左右，因此，人们目前看准了价格便宜而容量大的 CDROM，只是它的存取速度比其他的存储器慢一些。自从出现 CDROM 之后，便加快了视频信号的数字化进程。

在前面已经说过，由于数据传送线路的制约，视频信号的数字化过程晚了一些。比如说，采用以前的电话线时，模拟信号具有大约 3kHz 频带，而传送数字信号时，每秒可以传送 19K 位的数

据。这样无论如何也不可能传送数字视频信号。因此，现在非常重视数据电缆，推出了在有线 TV 中模拟的同轴电缆，它是非常好的数字信号传送线，用它传送模拟信号时，可以传送 550MHz 的信号，而且每秒可以传送 300M 位的数字信号。进入 20 世纪 90 年代之后，人们迅速推进了视频信号的数字化进程。

如上所述，多媒体的主要技术有数字音频和数字视频信号的接口技术、数据的压缩、保存即存储技术、传送数字信号的输运技术等。多媒体系统的发展趋向是，1993 年以前出现了视频 CD (VCD)、CD 卡拉 OK、游戏机等的系统；1996 年可能出现 Z—Fax、电缆 TV、数据库系统 (DBS)、程序控制系统 (PCS) 等；2000 年可能出现 HDTV、地址变换存储器 (ATM) 及视频组合系统等。

由于多媒体的市场行情随时在变化，很难准确判断 。但根据 1994 年度的资料来看，最大的市场是 PC，然后是生产率逐渐上升的数字化 Z－Fax、数字化的 TV、程控 (PCD) 卡、视频 CD (VCD)、数字影像机 (DVDP)、视频组合器等。估计到 1997 年市场上将出现约 1.3 亿台多媒体产品，到 2000 年可能达到 2.3 亿台规模的市场。

JPEG 是静止图象的技术，主要用来分析医学方面的图象。MPEG1 是以 CDROM 为基础的动态图象技术，MPEG2 则是以广播为前提的视频信号的压缩和保存的标准技术。

从视频信号的分辨率来看，对转换准备就绪适用的分辨率有 CIF 或其 1/4 级的 PCIF，也就是具有目前广播用的 NTSC 的分辨率；MPEG1 具有标准 TV 广播的 1/4 左右的 SIF 分辨率；MPEG2 则具有 CCIL60 的分辨率。另外，HDTV 具有标准广播分辨率 4 倍的析像清晰度。

根据分辨率和数据压缩率决定 MPEG2 的规格。现在以

NTSC 的分辨率为基准，有主水平、比它低的低水平，比它高的高水平等，高水平又可分为具有 1 440 个像素和 1 920 个像素的两种。数据压缩率可分为单线方式、主轮廓、标准（SNL）轮廓、特种轮廓、高级轮廓等 5 种。现在美国型的 HDTV 规格具有高水平的分辨率和主轮廓压缩率；在美国研究的数字电缆 TV 或数字卫星广播 TV 中具有主水平分辨率和主轮廓的压缩率；欧洲的 HDTV 的规格为高水平的 1 440 像素的分辨率和特种轮廓压缩率；日本的 HDTV 还未决定采用什么标准的规定。

5.3　多媒体产品及其应用

MPEG1 应用于以 CDROM 为基础的 MPC，在 VCD 中，MPEG2 则应用于数字电缆 TV，大批量数据交换系统（BDS）、VCD 及下一代的 DVDP 中。MPC 系统是由 PC 为主的声频技术、通讯技术、视频技术为一体化的多媒体。在图象视频处理中要求立体图象、动态图象数据的压缩和保存等技术，在声频处理中要求音响的组合和分解等的技术，在电话方面则要求 Fax 等的技术。在 PC 结构中装入 CDROM，它所提供的技术有 MPEG 声频和 MPEG 视频技术。

HDTV 系统的例子有数字电缆 TV 和数字电压源（DVS）等的产品。这个系统可分为频道编码部分和源编码部分。在频道编码部分中适用绝对地址装入程序（ABSL）等的调整技术。源编码部分则适用 MPEG2 系统的译码器、视频译码器、音频译码器技术。HDTV 的基本系统与数字 TV 结构相似，在频道编码中适用数字存储缓冲器单元（DSBE）技术，而在源编码中则适用 MPEG2 的高水平、主轮廓技术。

从数字 TV 的趋向来看，以美国标准公司为主干而开始的数字 BSTV，即卫星广播 TV 中，频道编码适用 QPS 技术，而源编

码的视频则适用MPEG2视频，音频则使用MPEG1的。美国贝尔研究所是以电缆TV为主实验广播的数字电缆TV，在频道编码中适用高级数据系统（ADS）、回退字组（BSB）等技术，源编码中的视频适用MPEG2的，音频则适用2BS3技术。美国型HDTV的频道编码中适用ESB，源编码中的视频适用MPEG2，音频则适用2BS3技术，对MPEG2的视频，与数字电缆TV不同，它可提供主轮廓的高水平分辨率。

在日本的HDTV中，频道编码适用最佳反馈数据管理（OFDM）方式，源编码中的视频适用MPEG2视频，但音频则还未决定。在欧洲的HDTV中，频道编码和日本一样适用OFDM方式，源编码的视频适用MPEG2视频，而音频也是适用MPEG2的。

作为VCD的下一代产品DVDP，基本上可分为CDROM信号处理部分和视频、音频信号处理部分，但VCD中的信号处理估计适用MPEG2的视频和音频或2BS3。

韩国三星公司现在批量生产的产品有NTSC编码器、视频接口部分的NTSC编码器产品，音频部分有音频CC尺寸产品。开发中的产品有MPEG1、视频译码器、VCD、视频编码器集成电路、Z—Fax专用视频编码器集成电路以及和NTSC同时进行开发的计数器末端产品、提供计数器终端功能和扫描及过程控制接口（PCI）间歇的产品等，另外，NTSC和PAL前沿终端部分的集成电路也在开发之中，准备要开发的产品有MPEG1音频、MPEG2视频译码器、同时提高NTSC和PAL的编码器集成电路、音频CC尺寸集成电路等产品。

第六章　其他半导体器件的发展

自从1948年贝尔研究所发表晶体管的发明以来，经过半个世纪的发展历史，已出现了非常多的各种半导体器件。这些半导体器件大体上分为半导体分立器件、集成电路、半导体光电器件、半导体微波器件、半导体敏感器件等。半导体集成电路已在第三章和第四章中介绍了，半导体光电器件在第三篇中将要介绍。在本章中介绍半导体分立器件，其中主要介绍半导体功率器件以及半导体微波器件和半导体敏感器件等的发展。

6.1　半导体功率器件

目前应用的半导体功率器件有分立器件和线性集成电路。分立器件中有功率晶体管，简称TR，金属氧化物半导体场效应晶体管，简称为MOSFET，功率微型组件及正在开发中的绝缘栅双极晶体管IGBT等。线性集成电路中有音频、视频、变频器、通讯及多功能用集成电路（IC）。

半导体功率器件可分为能够起到放大开关作用的晶体管、晶闸管、MOSFET以及控制和驱动它们的线性集成电路，除了分立功率晶体管和MOSFET外，还有工业用集成电路，其中有OP放大器IC、比较器IC、调节器IC以及多功能IC等。

首先分析分立器件的放大功能和开关功能。晶体管的结构由发射极E、基极B和集电极C构成，它有NPN型、PNP型和PNPN型晶体管。所谓的放大作用是，在发射极和基极之间施加小信号时，在发射极和集电极之间得到放大了的信号。放大信号和小信号之比称为放大系数，即AGP。下面分析开关功能：我们常把220V交流电压变换成交流（AC）或直流（DC）的所需电压，

以便作为IC或计算机电源使用，较高的AC电压则作为信号灯的电源使用。一般用电流和电压的乘积表示功率，在功率器件的开关功率中，还有开关的次数，即开关频率决定其功率。总的说来，由电压和电流的乘积及开关频率决定功率，开关频率越高，功率也越大，这个开关频率是时间的倒数。

如上所述，半导体分立功率器件有晶体管、MOSFET、IGBT等。晶体管由发射极、基极、集电极构成，MOSFET由源（S）、栅（G）、漏（D）构成。而IGBT由晶体管和MOSFET结构来结合，由发射极（E）、栅（G）、集电极（C）构成。晶体管也称为双极晶体管，它是由两种载流子，即电子和空穴参与工作的器件，也是电流控制型器件。MOSFET称为单极晶体管，它是一种载流子，即电子或者空穴参与工作的器件，是电压控制型器件。IGBT是上述两种结构相结合的器件，也是电压控制型器件。

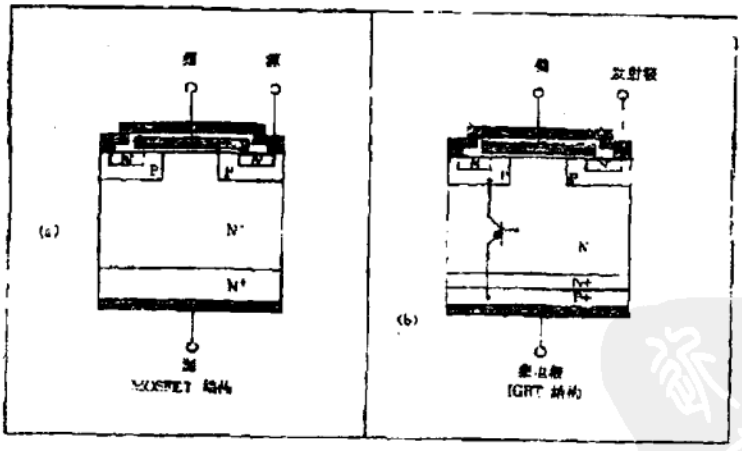


图 2.6-1 MOSET 和 IGBT 的结构比较

功率晶体管具有EB之间饱和电压和EC之间输出电压大的

优点。它的缺点是：由于两种载流子同时参与工作，因此，开关速度慢，而且EB之间的功耗大。为了克服晶体管的上述缺点而开发研制的产品就是MOSFET器件，由于它只有一种载流子参与工作，所以具有开关速度快及用电压控制电压和电流的优点。它的缺点是由于漏极（D）的功耗大而不能得到大的输出电压。为了克服上述TR和MOSFET器件的缺点而设计的就是IGBT器件，它具有开关速度快、饱和电压低、输出电压大、安全工作电压和电流范围大的优点；它的主要缺点是价格贵，因此，目前在应用上受到限制。当前还是广泛使用价格便宜的晶体管，它的应用率占全部功率开关器件的70%左右，然而，由于MOSFET和IGBT器件的性能比TR优越，将来随着价格的降低，相信一定会扩大应用市场。

在工业用IC中有运算（OP）放大器、比较器、调节器和多功能的集成电路。首先分析OP放大器，它是一种高增益、高输入和输出的差动放大器，它可分为负端子和正端子。根据外部电路它的输出可以变换，比较器是输入信号和参考信号做比较而检验有无输出信号的装置，输入信号和参考信号做比较时，如果输入信号比参考信号大，输出端无输出信号或者变成负信号 。如果输入信号比参考信号小时，输出端有输出信号，顾名思义，比较器是做两种信号比较的装置。调节器（PWM）是对脉冲宽度进行调制而输出稳定脉冲信号的装置，比如输出信号大时，把脉冲宽度调节成小，如果输出信号小时，则把脉冲宽度变大而输出稳定脉冲信号。在调节器中有三种模式。电压模式、电流模式和共振模式。电压模式是输入一定信号控制开关的工作模式；而电流模式是不输入信号，利用内部电流，如发射极或源电流控制开关工作的模式，由于后者的电路比较简单，目前电流模式逐渐代替了电压模式；共振模式是通过共振方法得到无损失稳定开关工作的模式，上

面已讲过，频率的改变使功率改变，因此，共振模式可得到高效率且稳定的输出信号。

下面介绍工业用IC中的多功能装置。这里有全补偿IC、漏电切断检测IC、电流充电IC、电压探测IC、平衡控制IC等。全补偿IC具有输入交流电220V变成稳定输出电压的功能，即起稳压器作用。漏电切断检测IC具有检测输入电压漏电，防止发生火灾的功能。电池充电IC具有对输入交流电进行充电的功能，电压探测IC具有保护存储器的功能，平衡控制器具有控制开关工作并保护平衡系统等功能。

从功率器件的应用来看可分成5个组。第一组中有电压为50～500V，电流为1～2A的功率器件；第二组中有50～220V电压，电流为5～70A的功率器件；第三组中有电压为400～600V，电流为5～7A的功率器件；第四组中有700～1 500V电压，7～20A电流的功率器件；第五组有大功率器件，一般称为硅整流器、可控硅或晶闸管的电力器件，它们的电压一般为3 000V左右，电流为300A。

功率器件的应用系统可分为4个方面：AC电压及电流变换成DC电压及电流；AC变成高压或低压的AC；DC电压及电流变换成不同电压和电流的DC；DC电压及电流变成AC电压及电流。

下面具体介绍几个大功率器件的应用。在没有半导体功率器件的变压器中，温度的调整不是自动的，而且能量损失也大。但利用半导体功率器件时，比如IGBT，温度是自动控制的而且节能30%以上，所以具有很广的应用价值。它的工作原理也是220V的交流电通过TR或MOSFET变成我们需要的DC或更高的AC电压，并作为外部设备的电源使用。

在家庭中使用的日光灯镇流器，可以用平衡电子系统代替旧

式的闪光灯泡，闪光灯一闪一闪的动作就是用开关作用提高日光灯电压的，但这时耗能较大 。如果使用半导体功率器件的开关来提高电压，不仅可使其体积减小，还要节省 50%以上的电能。但是，目前不能大量应用的原因是它的价格比旧式的镇流器大 5 倍，今后随着价格的下降，一定会扩大应用范围的。在这种平衡系统中具有 3 个起开关作用的功率器件及其他的控制、保护日光灯，即延长日光灯寿命的电路和器件。

对在野外活动时使用的野外电子灶来说，只要带去蓄电池就可以做饭和做菜，这种电子灶中有利用半导体功率器件把 DC 变成 AC 的装置，因此，它可以驱动电子灶。

6.2　半导体微波器件

从 20 世纪 60 年代半导体微波器件出现以来，人们对微波装置固体化的研究活跃起来了。晶体管工艺技术的发展和新半导体材料的出现，进一步推动了微波器件的研究。

变容低噪声参量放大器、高效率倍频器、隧道二极管、宽频带噪声放大器以及肖特基二极管宽频带噪声混频器等的实际应用，不仅对地面通讯的发展，而且对宇航及卫星通讯的发展也做出了很大的贡献。微波晶体管的迅速发展以及耿氏二极管和雪崩二极管等的出现，大幅度促进了微波设备的固体化，同时微波集成电路技术的进步和新半导体器件的实际应用 ，也促进了微波设备的小型化和批量生产。虽然半导体微波器件的发展很快，但目前还存在有待进一步研究解决的问题。

作为半导体微波器件材料，以砷化镓为首的Ⅲ－Ⅴ族和其他化合物半导体材料占据着重要地位。化合物半导体材料有很多特点。比如，禁带宽度有大的，也有小的，有些化合物半导体的电子迁移率非常大，有的介电常数比元素半导体的小。从能带结构

上看，有直接跃迁型和间接跃迁型。但是，很长时间以来，从应用于器件的角度来看，它们远远落后于元素半导体锗和硅，其原因在于制备化合物半导体材料难度大。

在化合物半导体器件中，最早被广泛应用的是肖特基二极管，其原因是肖特基二极管的结构比较简单，同时可以采用比较低的温度的真空镀膜工艺实现化合物半导体单晶表面与金属之间的肖特基接触。这样一来，在很大程度上避免了在器件制造工艺过程中使化合物半导体单晶表面上的化学计量比偏离，从而保证了器件的性能。

肖特基二极管是利用多数载流子工作的器件。由于没有少数载流子的影响，它不仅可以作为快速开关二极管、微波混频管和微波变容二极管使用，而且还有很多其他种类的组合器件，例如作为微波晶体管等的应用。

肖特基二极管的高频特性，由正偏压下的截止频率 f_c 决定。要提高肖特基二极管的工作频率，必须选择迁移率大而介电常数小的半导体材料，这些材料有 InSb、InAs、GaAs、InP 和 GaSb 等化合物半导体。但是，在这些材料中，主要用 GaAs 单晶制备肖特基二极管，这是因为对于器件一般要求在室温下能稳定工作，加上这样一个条件，就会发现，应该选择的材料禁带宽度必须超过 0.70～0.75eV 以上，如果低于这个值，则在室温下容易产生热激发载流子，器件不能稳定工作，这样一来，电子迁移率非常大的 InSb 和 InAs 都不适用。然而，若使器件在低温下工作，这两种材料还是非常好的微波用肖特基二极管材料。在剩下的三个材料中 GaSb 的性质基本上和锗差不多，如果今后在迁移率方面没有显著的提高，就没有多大希望用来作微波用肖特基二极管。至于 InP 显然不如 GaAs。如果 InP 和 InAs 的固溶体 $InAs_{1-x}P_x$ 的单晶质量进一步提高的话，这个材料很有希望作微波用肖特基二极管，它

的室温电子迁移率可以从 InP 的 4 600cm²/V·s 变到 InAs 的 33 300cm²/V·s。如果要求它的禁带宽度为 0.75eV 时，使其组分比 $x \geqslant 0.45$ 就可以了。这个材料在 $x=0.45$ 时，它的电子迁移率可达到 9 000cm²/V·s，虽然这时它的介电常数比 GaAs 大一些，但总的性质与 GaAs 差不多，因此，最有希望作微波肖特基二极管的半导体材料是 GaAs，仅次于它的是 $InAs_{1-x}P_x$（$x \geqslant 0.45$）。

双极晶体管的最大工作频率 f_{max} 与肖特基二极管不同的是，不仅电子迁移率要大，而且空穴迁移率也要大，再加上在室温工作条件下，只有 GaAs 和 GaSb 合适。固溶体 $InAs_{1-x}P_x$（$x \geqslant 0.45$）虽然具有和 GaAs 差不多大的电子迁移率，但是由于它的空穴迁移率比较小，而且介电常数也比 GaAs 大，因此，用它作双极晶体管不会比 GaAs 要好。总的看来，GaAs 是最好的微波晶体管材料，其次是 GaSb。

场效应晶体管的高频特性 f_{max} 与载流子的迁移率、饱和速度和饱和电场成正比，与介电常数成反比。GaAs 是目前单晶制造工艺比较完善，人们对其性能了解也比较多的化合物半导体，是制备场效应晶体管的好材料，然而，它的电子速度在超过饱和速度之后很快变小，这就限制了电子饱和速度和饱和电场的进一步提高。

1963 年发现了耿氏（Gunn）效应。在 GaAs 单晶块上施加电压时，起初电流值随电压的加大而增加，但当电压增加到一定阈值电压时，电流就达到饱和值，电压再增加超过阈值电压时，电流就开始减少而呈现负阻现象。这种在 GaAs 半导体中所出现的由电压控制型负阻特性而产生的不稳定现象，根据发明者 J. B. Gunn 的名字被称为耿氏效应，而利用这种耿氏效应的振荡器叫做耿氏二极管或体效应管。这种耿氏二极管作为微波固体振荡器而受到人们的重视 。

在耿氏二极管上施加比阈值电压稍大的电场时，由于某种原因，如材料的不均匀性或噪声等因素的影响，在耿氏二极管中产生较大的电场区。这时由于产生负阻效应，该电场区的阴极处积累电子，而在阳极处则缺少电子。这样一来，该电场区的电场又得到加强而形成空间电荷层，这种空间电荷层被称为高场畴，这个高场畴一边成长一边向阳极运动。由于加在耿氏二极管的偏压中的一部分被高场畴吸收，因此，外部电压下降而通过二极管的电流也相应地减少。当高场畴形成完了时，电流达到极小值，而高场畴运动到阳极后消失，电流又恢复到原来的状态。这种现象反复进行的结果，在耿氏二极管中产生电流振荡而发射出微波。

如在第三章第三节中提到过，1966 年利用处延 GaAs 单晶，美国国际半导体公司出售了最初的商用耿氏二极管而开辟了固体微波电路的道路。随着耿氏二极管的出现，产生了利用耿氏效应的高场畴性质，能够进行脉冲发生逻辑动作功能的想法。1964 年做出了逻辑电路，1967 年提出了利用耿氏效应高场畴的逻辑、存储器件，接着又提出了超高速脉冲发生器、脉冲再生器、波形发生器、逻辑器件等；在欧洲也提出了利用耿氏效应高场畴的功能器件。根据耿氏效应中的高场畴，与只用在一块单晶中形成电极而完成以前复杂电子线路才能完成的电功能的想法和功能器件的概念完全一致，因此，耿氏效应器件作为功能器件倍受重视。

在半导体 PN 结或肖特基势垒中施加击穿电压以上的反向偏压时，产生载流子（电子-空穴）的雪崩倍增现象。在雪崩倍增时会出现产生载流子的时间延迟和渡越时间效应，由于这些效应，在 PN 结的伏安特性上出现负阻效应。利用这些负阻效应做成的微波振荡或放大器件被称为碰撞雪崩渡越时间二极管（IMPATT）。它有：P^+NIN；N^+PIP^+；P^+N；N^+PIN 形以及肖特基势垒等形式的结构。

除了碰撞雪崩渡越时间二极管外，还有俘获等离子雪崩触发渡越二极管（TRAPATT）。这个雪崩二极管的特点是它的工作频率虽然比 IMPATT 低，但功率和效率都非常高。在 TRAPATT 中施加短时间的高电压之后很快降低电压时，由于雪崩击穿而产生的电子和空穴的等离子体在低电场中缓慢移动而长时间通过大量的电流。因此，得到与电压波形几乎反位相的电流波形从而使振荡效率很高。

6.3　半导体敏感器件

随着工业生产的发展，传感器技术越来越受到人们的重视。在生产设备和家电中敏感器件的应用，现在和将来都占据着很重要的地位。从长远来看，物体的识别、图象的处理等的图象传感器和在与光通讯、微波通讯与信息处理等方面有关的敏感器件的数量要增长，质量也要提高。

从检测对来看，以检测机械量为目的的传感器，现在和将来都约占总数的 30%左右。与此相比，检测光的传感器将来要逐渐增加，这与信息处理、通讯、电台等方面的用途扩大有紧密联系。另外，检测化学成分、湿度、气体等的所谓化学传感器所占据的比例将来也要逐渐增加。

从功能变换的情况来看，光电变换、压（力）电变换、热电变换、光磁变换的传感器将来会占有很大的比例，另外，离子变换反应、光化学反应、生物反应方面的传感器的比例将提高。现在和将来以半导体材料为主的无机材料是主要的传感器材料，将来可能开发出有机和无机混合材料、以高分子和酶为中心的有机材料等。

从传感器技术的研究课题来看，现在的主要研究课题是耐环境性、灵敏度、检测界限、准确度、可生产性、随时间变化等技

术。与此相比，在将来，精度、准确度、复合化、功能化、响应速度、选择性等技术的比重将增加。

1. 半导体光传感器

研究光传感器的历史很早，我国古代利用烽火台传送信息也是一种光传感技术。光传感器的种类非常多，应用范围也很广。最近随着信息处理能力的提高及高速化，光传感器在光通讯中将起重要的作用，同时，随着光电子学的发展，光敏器件的研究受到人们的很大重视，如已经提到的高技术领域中进行各种光传感器技术的研究工作。从狭义的角度来讲，光敏器件常常指的是光检测器，然而，如今各学科的交叉与渗透，边缘学科的兴起，它已不仅仅是指光检测器，以光为媒介的各种光电器件都属于光敏器件。

半导体光传感器的工作原理是利用以下几种效应和现象作为基础的，即光电导效应、光生伏特效应、外光电效应、热释效应、半导体发光现象等。半导体光电效应可分为本征光电导效应和杂质光电导效应，本征光电导效应是光照射半导体时，价带的电子吸收光子的能量后，跃迁到导带而产生电子—空穴对，这些附加的光生载流子参与导电而使电导率增加；杂质光电导效应是当光照射半导体时，杂质能级上的电子吸收光子的能量后，跃迁到导带而参与导电或价带电子跃迁到受主能级上产生空穴参与导电而使电导率增加的效应。

光生伏特效应是在半导体PN结区、金属和半导体接触区（肖特基势垒区）或者异质结区中，由于光的吸收而产生的电子空穴对，在PN结区的内建电场作用下，空穴向P区，电子向N区移动，形成自N区向P区的光生电流。这样的载流子运动，中和掉部分空间电荷，使内建电场势垒降低，从而使正向电流增加。当光生电流和正向电流相等时，PN结两端建立起稳定的电势差U（P区相对于N区是正的），这就是光生电压。

外光电效应即固体受光照射后，有电子从固体中发射电子的现象。利用光阴极受光照有电子发射的光敏器件被称为外光电效应光检测器。它是测量对应于入射光量子数，从物体表面发射出的电子数来检测光的光敏器件。

若想检测红外线区域的光，或者想知道包含各种波长光子的光的全部能量时，常使用热释电效应型光检测器。它是由很薄的片状半导体材料构成的。它吸收红外线后温度上升，并利用塞贝克效应，或者利用电阻的温度系数的测量来测定其温度的变化，达到检测红外光的目的。这些光敏器件与光电器件不同，检测灵敏度与光波长几乎无关。另外，还有利用由于吸收红外线而使温度的变化和晶体的自发极化相结合而制成的热释电效应型光检测器。

1923 年在半导体 SiC 中最先发现电致发光现象。1955 年又发现Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体材料 GaP 的发光现象。从 1962 年在 GaAs 中获得高效率的红外光发光和 GaP 中的可见光发光以来，发光二极管的研究工作进展很迅速。后来又利用 GaAs 和 GaP 的固溶体 GaAsP 研制出可见光发光二极管，并于 1968 年付诸于实用。目前已做出了色三要素的红、绿、蓝光的半导体发光二极管。

激光 (Laser) 是受激辐射光放大的简称，它是一种亮度极高，方向性和单色性很好的相干光辐射，在激光研究工作中取得比较显著成就的是半导体激光器。半导体激光器比其他激光器体积小，并具有以简单的直接电流调制的，作为激光通讯中的理想载波源而受到重视。从 1966 年以来相继出现了 GaAs/AlGaAs 单异质结和双异质结（1970 年）半导体激光器，并取得了很大的进展。

二维光敏器件有固体摄像器件，即 X Y 指定摄像方式的 MOS 型和信息传送摄像方式的电荷耦合 CCD 型及斗链 BBD 型。在摄像管中是以电子束扫描的方式在 CRT 中显示图象的，但是，

在固体摄像器中则利用电开关方式，即从每个像点中取出图象电信息，因此，在一个器件中具有光电变换功能、像点切换功能和扫描功能的三个功能，也就是说，在一个 Si 片上形成光图象 时，从这个 Si 片中可取出影像的图象电信号。根据图象电信号的取出方式，固体摄像器可分为两种，一种是以 MOS 型图象传感器为代表的 X Y 指定方式，另一种是以 CCD 的电荷耦合器件为代表的器件本身具有信号扫描功能的方式。

由光检测器、发光器件、光耦合器、光显示器以及若干特殊器件等组成的半导体光传感器，从 20 世纪 60 年代以后得到了很快的发展。半导体光电器件从产量和销售的增加速度上几乎和集成电路相当。从品种上已有 20 多类，上万个品种。因此，由这些半导体光电器件组合而成的半导体光传感器种类也非常多，它在工业自动化、军事科学化、计算机技术等方面发挥着重要作用。

这里介绍几种典型的半导体光传感器。(1) 半导体光电耦合器。20 世纪 70 年代以后出现了半导体光电耦合器，由半导体发光器件和半导体光二极管或光晶体管组成的光电耦合器的输入与输出之间是隔离的。它在代替脉冲变压器使用时，可以耦合从零到几百千赫的信号，而且失真很小；另外，光电耦合器代替继电器使用时，又能克服继电器在断电时反冲电动势的泄放干扰及触点抖动等不可靠的问题，又能很容易地把不同电位的两组电路互联起来，从而很简单地完成电平匹配、电位隔离等功能。光电耦合器的输入端的发光器件是电流驱动器件，抗干扰能力很强。在长线传输中用它作为终端负载时，可以大幅度提高信噪比。在计算机主机运算部与输入输出软件之间用光电耦合器作接口时，会大幅度增强计算机的可靠性，由于光电耦合器的饱和压降比较低，在作为开关器件时，又具有晶体管不可比拟的优点。在电源中作为过流保护器使用时，可使电路大大简化。(2) 光纤传感器。利用

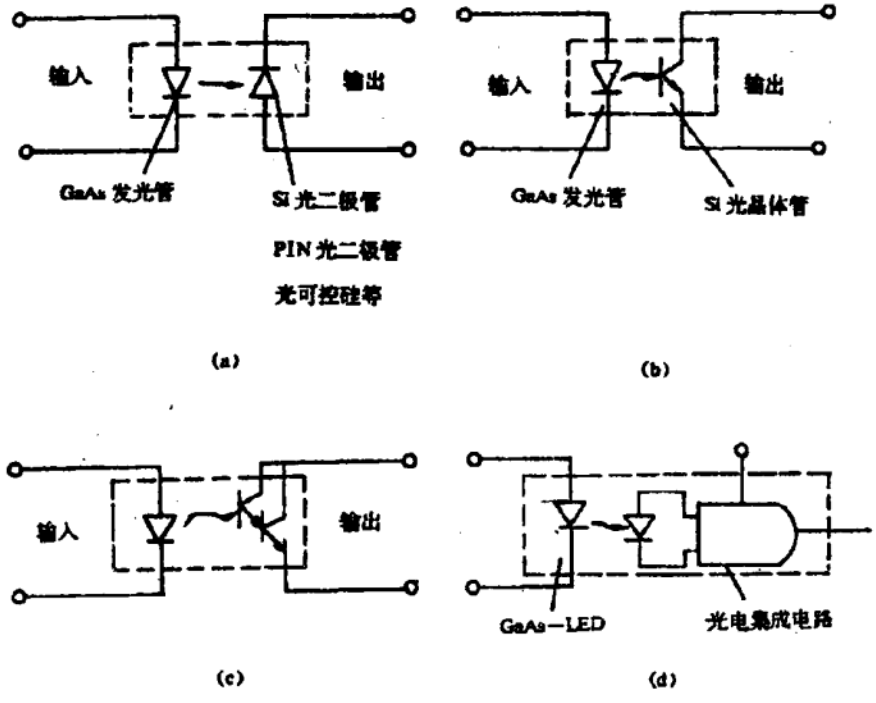


图 2.6-2　光电耦合器

光纤传感器可以测量磁场强度、电压、电场强度、温度、流速、角速度、振幅、压力、声强、放射线、光信息等各种物理量。光纤很轻，电绝缘性很高，而且能够传送的信息量大，因此，在传感器技术中受到人们重视。光纤传感器通常分为两类：一类是利用光纤本身所具有的传感功能做成的敏感器件型光纤传感器（FF）；另一类是在光纤的前端装一只传感器的传感传输线路型光纤传感器（NF）。光纤是由石英系玻璃制成的能够传送光的纤维状线，其长度为 20cm 时具有 100kV 以上的电绝缘性能。因此，利用光纤可以在高电压下迅速测出电磁场、温度等物理量。光纤还有不受周围环境中的电磁感应等干扰以及耐腐蚀性很强的特点，在水、溶液或化学气氛中均可进行测量。（3）红外光传感器。住宅或办公

室门的自动开关，靠近或离开书桌时自动开关台灯等不仅从方便的角度，而且从节能的角度来看都是很有益的事情。这是利用能检测人体发出红外线的红外光传感器进行开关工作的。实际上，不仅是人，连动物、植物等的生物体都能发射出红外线。桌子、书等非生物体，如果它们的温度比绝对零度高时，也都发射出与温度相对应的辐射线。人体的体温一般为37℃左右，从人体表面发射出的红外线波长约为10μm，红外线开关越来越多地在各个家庭中使用，具有代表性的是电视机的频道遥控器，这种遥控器一般称为主动型红外线传感器。

另外，还有半导体光集成电路传感器、半导体放射线传感器，其中配有半导体放射线计数管、半导体原子能电池等。

2. 半导体磁敏器件

半导体磁敏器件的特点是，从直流到高频，比如数十GHz，其特性完全一样，也就是完全不存在频率关系。这是因为半导体中电子的运动受磁场影响，是以电特性的变化来表现的。但是，在磁敏器件的主要材料半导体中，电子的运动速度非常快，这是由于不受其频率影响的缘故。半导体磁敏器件产生与磁场强度成比例的电动势，它不仅能够测量动磁场，静止的磁场也能把它变成电信号，也就是用线圈探测静磁场时，只要线圈相对运动就可以测出静止的磁场强度。这就可以发挥半导体固有的共同特点，也就是能够小型化和集成化。目前利用半导体可以做成微型的磁敏器件。现在有的半导体磁敏器件其工作面积只有$2\times2\mu m^2$，但是，这并不会因面积小而会降低磁敏器件的灵敏度。

磁敏器件的工作原理主要是利用劳仑兹力或者电磁感应现象。磁敏器件有霍耳器件、磁阻器件、磁量子器件、磁二极管、磁晶体管等。研究磁敏器件的历史悠久，我国在世界上最早发明的指南针就是现在的磁敏器件的一种。1879年霍耳效应的发现和

1883 年磁阻效应的发现，使磁学理论的研究有了很大的进展。但真正做成实用器件还是随着半导体材料的发展、InSb 等高迁移率材料的出现，才使制造高灵敏度磁敏器件成为可能。20 世纪 60 年代初，西门子公司制造出第一个实用器件，1968 年和 1971 年日本索尼公司相继制造出锗、硅磁二极管，它具有优良的特性，转换灵敏度比霍耳器件高几十倍，甚至几千倍。后来继续研制磁晶体管、磁开关管以及磁可控硅和霍耳集成电路等。磁敏器件作为无接触开关、无触点检测器等已广泛应用于工业生产和科学研究中。下面介绍几种已广泛应用的半导体磁传感器。

（1）霍耳马达。直流马达（DC）从原则上不可能做成像交流马达（AC）那样的无整流子、无刷子的结构。但采用某种方法并用 DC/AC 变换装置等价地把 AC 马达做成 DC 马达来工作。DC/AC变换法有利用光的方法、静电容量法、高频感应法等很多种。但是，利用霍耳器件的霍耳马达具有结构简单、特性优良的特点，从而被广泛应用。这种电动机月产量为几百万台，是工业发展上的一大贡献。（2）电流传感器。利用霍耳器件测量电流时，根据被测电流的交、直流与否，其电路结构完全不同。这是由于霍耳器件的非平衡电压和热电动势等的误差因素对交流和直流测量精度的影响不同的缘故。测量交流电流时，采用 GaAs 霍耳器件的恒定电流源工作方式，测量直流电流比测量交流电流复杂一些，其原因在于对测量精度的影响因素比交流多的关系。（3）无接触电位器。磁阻器件的无接触电位器工作方式有：串联两个磁阻器件，移动紧挨着的永久磁铁来改变电位器输出信号的方式；与上一种方式相反，永久磁铁被固定好而移动磁阻器件的方式；还有一种是磁铁和磁阻器件紧密固定之后，移动紧挨着的偏转线圈来改变磁场的方式等。在这三种方式中磁铁或偏转线圈都是在与磁阻器件无接触状态下移动的。

测量各种机械量时，大量采用磁敏器件的最大理由是制备磁场不需要特别的能量。利用永久磁铁可以很容易得到磁场。另外，一般机械零件大多数是铁做的，它是一种强磁性体。因此，一般不需要另外的特殊材料来构成测试系统，而是利用机械零件本身就可以了。

3. 半导体力学量敏感器件

半导体力学量敏感器件是20世纪60年代出现，在70年代迅速发展起来的一种新型的测量力学量的敏感器件。由于这些器件利用了半导体材料的压阻效应、压电效应等，所以亦称为压力敏感器件，它代表了当代压力传感器技术的新成就。

力学量传感器的种类比较多，但是，半导体压力敏感器件与其他类型力学量的敏感器件相比有很多优点，它灵敏度高、精度高、动态特性好、重复性好、迟滞小、体积小、结构简单、寿命长、工作可靠，可在振动、冲击、噪声等恶劣条件下工作。近年来随着集成电路技术的发展，半导体压力敏感器件的发展极为迅速。现在已发展到应用集成电路技术将电子补偿电路、计算电路连同应变电阻和温度补偿电阻一起都集成在一个硅片上，从而为力学量敏感器件的微型化、数字化和高精度化开辟了广阔的前景，使工业自动化仪表及其在航空、化工、医疗等测试方面的应用进入了一个新的时期。

固体产生压阻效应的原因大体上有两个：一个是固体的外形随应力而变化，也就是长度和断面变化而带来电阻的改变；另一个是由于应力，固体电导率本身变化而带来的电阻变化。金属压阻效应的主要原因是外形变化，与此相反，锗和硅那样的多能谷能带结构的半导体压阻效应主要是电阻率本身发生变化。

在半导体中施加应力时，和金属一样，它的长度和截面发生变化而导致电阻率的改变，这种现象被称为形状应变效应。当在

固体中施加应力时产生的介质极化现象被称为压电效应，相反，在具有压电效应的固体中通电流时产生应变的效应被称为逆压电效应。

压力传感器的应用范围非常广泛。在工业上的各种测试、理化分析、医学、汽车、机械自动化、机器人、油压或空压机等方面都使用压力传感器。压力传感器的检测对象有：检测压力的有无；检测气体、液体的流量；检测液位或水位；检测距离；检测物体的有无及检测重量、力、高度、气密封性等。下面简单介绍近年来受重视的扩散型半导体压力传感器及其他半导体压力传感器。

随着集成电路技术的发展，出现了扩散型半导体压力传感器。由于它的精度高、可靠性好，现在被应用于压力测试及差压传送器等方面。在汽车方面的应用也引起了人们的注意。利用数毫米见方的N型硅片，采用腐蚀工艺在片子的中心部形成非常薄的膜片（厚度为数十微米），在膜片表面选择扩散硼元素而形成P型半导体层，这个P型半导体薄膜层被作为应变片使用。

1856年开耳芬首先发现应变效应之后，很多物理现象可以通过形变而转变成电信号，应变计作为这种变换的传感器被广泛应用。根据使用目的、结构、材料等的不同，已做出很多种类的应变片压力传感器，例如，根据电阻体可分为：电阻线应变计；电阻箔应变计；半导体应变计；蒸发应变计等。根据形状可分为：单轴应变计；多轴应变计；特殊模型应变计等。根据基座材料可分为：纸带应变计；电木应变计；环氧树脂应变计；聚酯应变计等。根据用途可分为：低温（－269℃～室温）；常温（－30℃～150℃）；高温（150℃以上）等应变计；大应力应变计；应力集中应变计；隔膜片应变计；掩埋型应变计等。根据使用环境可分为：抗磁性应变计；防水应变计；无感应应变计等。

应变计的基本测量电路常采取桥式电路。桥式电路的组成形式有：一种是桥式电路的四个臂全部由应变片组成；另一种是两个臂由应变片，两个臂由固定电阻组成；还有一种是一个臂由应变片，三个臂由固定电阻组成的。另外，当使用两个应变片或者四个应变片时，根据哪几个应变片具体地承受应力等情况，桥式电路的输出电压值有所变动。要计算各种情况的电压是很不方便的。因此，无论是四个或两个应变片，一律换算成一个应变片的电压表现出整个桥式电路的输出电压。

使用应变计方法有两种：一种方法是应变计贴在测量对象的具体场所，并在这个场所测量由外力而产生的应变，进而了解其外力（应力）来判断对象物质性质的方法；另一种方法是应变计贴在已知性质和尺寸的材料上，测量各种物理量（重量、压力、转矩、加速度等）的变换方法。

第一种方法常常作为应力测量的手段来应用，比如，测量各种结构物、机械等的附加应力强度，保证安全性及经济性，也可以作为非破坏性检验的手段而被广泛应用。第二种方法是作为工业计量上不可缺少的物理量传感器而被应用的。应变片传感器刚出现时只在大型漏斗重量测试或极有限的地方使用，但现在扩大了应用范围，比如，我们经常看到商店里的电子秤及汽车载重秤等，这些秤里都装有应变片传感器。

应变片重量传感器具有在力（应力）变成电信号时，其测量精度高（1/1 000～1/5 000），而且可以进行动态测试的特点，也具有可以做出能测出数千克至数百吨重量的传感器等特点。从原理上讲，可以做出能测量任何重量的传感器，但从经济上考虑只做出了数百吨为止的传感器。然而，由于传感器输出信号是电信号，使用 n 个重量传感器，把这些输出信号相加，可以完成任意重量的测量。它还具有结构简单，没有可动部分，寿命长的特点，

可以说是半永久性的重量传感器。还由于传感器输出信号是电信号，可以把重量信息传送到任何远距离的地方，而且可进行模拟显示、数字显示、控制等特点。

除了上述应变计外，还有压力敏感二极管，其中有通用型PN结二极管、齐纳二极管、隧道二极管及压力敏感晶体管等的半导体力学量传感器。

4. 半导体温度敏感器件

当某物体加热或冷却时，如果该物体的电学性质有变化，则可以利用这种性质变化把热信号转变成电信号，或者相反，把电信号变成热信号。进行这种转换的器件就是热电转换器件。

具有温度特性的物理量有热膨胀、电阻、热电动势、磁性、电容、光学特性、弹性（本征频率）、热噪声等。利用这些物理量与温度的关系可以做出各种温度测量的元器件。

利用热膨胀原理制成的温敏元件有各种水银温度计、酒精温度计、气体温度计、双金属片热敏元件等；利用液体或者蒸汽的压力来工作的压力式温度计；利用金属随温度的变化电阻率改变的白金电阻体测温元件；利用热电动势原理制成的各种热电偶；还有其他一些测温元件。这里主要介绍半导体测温元器件。

热敏电阻是一种对热敏感的电阻元件，一般用半导体材料做成。它的主要特点是灵敏度较高，其电阻温度系数要比金属大10～100倍以上。能检测出10^{-6}℃温度变化。小型元件尺寸可做到直径0.2mm，能够测出温度计无法测量的空隙、腔体、内孔、生物体血管等处的温度，使用方便，电阻值可在0.1～100kΩ之间任意选择。

半导体热敏电阻的工作原理一般用量子跃迁观点进行分析。由于热运动，譬如温度升高，越来越多的载流子克服禁带宽度（或杂质电离能）引起导电，这种热跃迁使半导体载流子浓度和迁

移率发生变化。

半导体热敏电阻大体上分为负温度系数热敏电阻(NTC)、正温度系数热敏电阻(PTC)和临界温度热敏电阻(CTR)三种。PTC和CTR热敏电阻在某种特定的温度下电阻急剧变化，因此，测定温度范围不很大，但在某种特定温度范围内它们的测量特性很好。NTC热敏电阻的测温范围比PTC和CTR广，其工作电阻从数Ω到100MΩ之间可以任意做出，但在100Ω～100kΩ范围内比较容易使用。

把两种不同金属线或半导体材料接触从而形成闭合电路，并把两个接点处于不同温度时可以产生热电动势，也就是塞贝克效应。利用这种效应测量温度的器件称为热电偶。

利用半导体二极管、晶体管、可控硅等的伏安特性与温度的关系可以做出温敏器件。集成电路温度传感器的开发只有十几年，但是，人们现在已越来越多地使用集成电路传感器，它是利用PN结电流电压特性的温度关系来测量温度的传感器，输出特性的线性关系好，精度也比较好，除了测温部分以外，还集成了传感器驱动电路、信号处理电路等，并把它们封装到小型密封管里，使用起来方便和安全，它的缺点是灵敏度较低。

用温度来驱动可控硅的控制极工作的器件被称为可控硅温度传感器。当温度升高到某设定值以上时可控硅就导通，当温度下降时还仍保持额定电流的导通状态，利用它的这种特点可以做成温度自动控制电路。由于它开关温度的可变范围很广、操作容易、价格便宜等原因，在家用电器、办公用仪器等很多方面被广泛使用。

光纤的特征是对电、磁及其他辐射的抗干扰性好，而且细、轻、能量损失少，因此，利用光纤做的传感器，在恶劣环境下也能正常工作。利用光纤的温度传感器目前有光干涉型（利用二根光纤

输出相干光)、红外线检测型、光路遮断型、荧光发射型（荧光与温度有关)、GaAs 或 CdTe 禁带宽度温度特性型等。

5. 半导体气敏器件

目前已使用的检测气体方法有很多种，如电化学方法、光学方法、电学方法等。其中电学方法中的半导体气敏器件因灵敏度高、价格低、制作简单、小型等原因而受到人们的重视。现在研究和使用的半导体气敏器件分为电阻式和非电阻式两大类：电阻式又可分为表面电阻控制型和体电阻控制型；非电阻型又可分为利用表面电位的，二极管整流特性的和晶体管特性的三种。

表面电阻控制型半导体气敏器件主要是利用其表面与被测气体相互接触所引起的物理化学作用产生的信息来判断该种气体是否存在。表面电阻控制型半导体气敏器件在吸附气体分子时，如果半导体气敏器件的功函数 Φ 比吸附气体分子的电子亲和势 χ 小，则吸附气体分子将从半导体表面中俘获电子而带负电。相反，如果 Φ 比吸附气体分子的电离能 I 大，则吸附气体分子向半导体气敏器件给出电子而带正电。因此，如果知道吸附气体分子的 χ 和 I 及气敏器件的 Φ，那么就可以判断吸附状态。例如，吸附气体从半导体俘获电子时，其表面形成一定厚度的耗尽层空间电荷区而表面电导率减少。

表面电阻控制型半导体气敏器件的工作原理，主要是靠表面电导率变化的信息来检验被接触气体分子的。因此，要求做这种器件的半导体材料的体内电导率一定要小，这样才能提高气敏器件的灵敏度。基于这个原因，一般用禁带宽度比较大的金属氧化物半导体材料（SnO_2 等）制备气敏器件。

从目前制造的表面电阻控制型气敏器件的结构来看，大体有薄膜型和烧结型。由于薄膜型气敏器件的表面积很大，表面电导率的变化对整个器件电导率的变化贡献大，所以它的灵敏度较好。

对于烧结型气敏器件来说，常常是多孔质的结构，因此，不仅表面部分吸附气体分子，多孔质内部也吸附气体分子，所以响应速度比较慢。

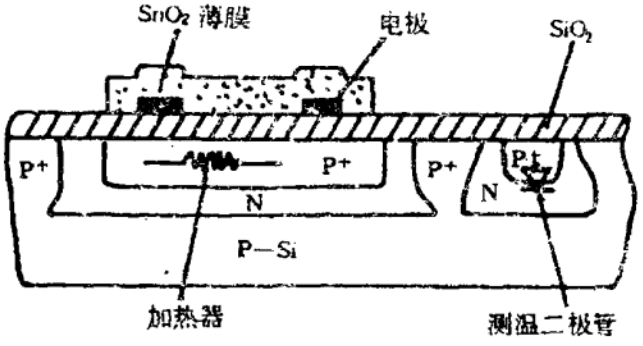


图 2.6-3 SnO_2 薄膜集成化气敏器件

体电阻控制型半导体气敏器件与被检测气体接触时，引起器件体电阻改变的原因比较多。对热敏型气敏器件而言，在600～900℃温度下，在半导体表面吸附可燃性气体时，由于这类器件的工作温度比较高，被吸附气体燃烧使器件的温度进一步升高而半导体的体电阻发生变化。还有一种原因是，由于添加物及吸附气体分子，在半导体能带中形成新能级的同时，在母体中生成晶格缺陷，结果引起半导体的体电阻发生变化。另外，很多氧化物半导体，由于化学计量比的偏离，尤其是化学反应强而且容易还原的氧化物，在比较低的温度下与气体接触时晶体中的结构缺陷就发生变化，继之体电阻发生变化，因此，它可以检验各种气体。

目前还利用金属半导体接触肖特基势垒的伏安特性以及金属氧化物半导体场效应管（MOSFET）的阈值电压等特性研究非电阻控制型半导体气敏器件。这类器件虽然还未被广泛应用，但由于可以利用半导体平面工艺，能做出小型、集成化、重复性、互换性和稳定性都很好的半导体气敏器件而备受人们重视。

随着汽车工业的发展，汽车的数量逐年增多，它们排出来的废气污染环境，尤其是汽车集中的大城市更为严重，影响人们的身体健康。目前，汽车上广泛使用三元催化剂系统。在汽车排出

来的废气中，对人体危害最严重的有 NO_x、HC 和 CO 三种气体，用于净化这三种气体的催化剂也就被称为三元催化剂系统，它在合适的空气和燃料的比例下把这三种气体转变成对人体无害的气体。空气和燃料的比例简称空燃比，NO_x、HC 和 CO 三种有害气体空燃比在 13.8～14.5 范围中变换成无害气体的效率最好。因此，利用氧气传感器，适当控制所需空燃比就可以大幅度地降低汽车废气中的上述三种有害气体，达到净化汽车排出来的废气，保障人们身心健康及环境空气的新鲜。这种氧气传感器有 ZrO_2（二氧化锆）氧敏器件、TiO_2 和 Nb_2O_5 等半导体氧敏器件。

6. 半导体湿敏器件

目前常用的湿度传感器种类有：机械式湿度传感器，如毛发式，尼龙式湿度计等；干湿球湿度传感器，即根据水的蒸发，从湿球的温度下降求出相对湿度的湿度计；利用电磁波吸收的湿度传感器，即从红外线或微波的衰减程度求出空气中的水分含量的湿度计；由电阻或电容容量的变化来测出湿度的湿度传感器，它们是电解质系、高分子系、金属氧化物等的湿度传感器；利用热传导的湿度传感器，这是根据空气中的绝对湿度不同，利用某些材料的热导率发生变化来测量湿度的传感器以及其他湿度传感器，这里简单介绍半导体湿度传感器。

在湿敏器件的发展过程中，由于金属氧化物半导体陶瓷材料具有较好的热稳定性及其抗沾污的特点，逐渐被人们所重视，因此，相继出现了各种半导体陶瓷湿敏器件。它寿命长，可以在很恶劣的环境下使用几万小时，这是其他湿敏器件所无法比拟的。半导体陶瓷湿敏器件，在对湿度的测量方面，可以检测相对湿度 1%（RH）的这样的低湿状态，而且，还具有响应快、精度高、使用温度范围宽（可在 150℃ 以下使用）以及湿滞现象小和可以加热清洗等优点。所以，半导体陶瓷湿敏器件已在当前湿度敏感器件的生

产和应用中占有很重要的地位。

MOSFET 湿敏器件是在 MOS 型场效应管的栅极上增加一层聚合物等感湿材料，在感湿材料上增加另一电极而构成的新型湿敏器件。在这种 MOSFET 湿敏器件的栅极上施加脉冲正电压时，经过一定时间后，正电荷均匀分布在聚合物等感湿材料膜上，并在栅极绝缘层下面形成 N 沟道而开始流通漏电流。这时环境的相对湿度的大小直接影响脉冲弛豫时间，也就是正电荷均匀分布在感湿膜上的时间随相对湿度而变化，因此，可以达到测量相对湿度的目的。由于这种器件是利用硅平面工艺技术制备的，所以为将来集成化湿敏器件的制备打下了基础。

利用肖特基结或 PN 结二极管的反向电流或反向击穿电压随环境相对湿度的变化，可以制成一种结型湿度敏感器件。在结型湿度敏感器件中，二氧化锡湿敏二极管是比较有代表性的湿敏器件。二氧化锡（SnO_2）湿敏二极管的设计思想是来自于二氧化锡光电二极管。这种二极管是在硅衬底材料上淀积一层透明而又导电的 SnO_2 薄膜层而构成的，当光通过透明的 SnO_2 层时，就在结上获得光电流。在生产中，一般为了使二极管性能稳定而在结区表面覆盖一层钝化介质膜，如 SiO_2、Si_3N_4 等膜，以免其受恶劣环境的影响。SnO_2 具有很好的导电性，因而可把这种结构的二极管看作是一个肖特基结或异质结，具有整流特性。如果这种二极管的结区不用钝化介质膜覆盖，而将其直接暴露于环境气氛之中时，结果发现，在二极管处于反向偏压状态时，在雪崩击穿区附近，其反向电流直接与环境的相对湿度有关，或者说，其反向击穿电压随环境相对湿度而改变，这就使二极管具有了感湿特性。

另外，为了制备集成化湿敏传感器，目前人们对湿敏晶体管进行了研究。在半导体表面吸附水分时，和气体一样，可改变半导体的表面电导率。因此，当半导体薄膜的厚度比器件长度小时，

由于水分的吸、脱附，半导体薄膜起栅极作用。利用这种效应而制作的晶体管被称为 AET 晶体管。

7. 其他半导体敏感器件

除了上述几种半导体传感器之外，还有超声波传感器、FET 传感器等，下面对这些传感器做简要介绍。人们听不到的声音一般被理解为超声波，但是，在超声波技术中对超声波的定义并不这样简单。虽然人们听到了声音，但不是为了听的目的而应用的声波，我们将其统称为超声波。利用超声波传感器进行物体的检测、距离的测量或者遥控时，首先要知道超声波的产生机理。超声波发生器是多种多样的。我们在这里介绍应用最广泛的压电振荡型超声波发生器。

一般来说，在压电振荡器上施加声压或应力时产生电压。相反，施加电场时产生振荡现象，这种性质被称为压电现象。产生超声波是利用施加电场产生振荡现象的压电逆效应，而接受超声波则是利用了前者的压电效应。

利用超声波设计遥控设备或测距等仪器的基本原理与雷达原理相同，只不过是由于雷达中使用的是电磁波，传播速度为 3×10^8m/s，相当于光速，而超声波的传播速度与声波相同，其速度为 340m/s，所以它们的性质是不同的。电磁波的缺点是，由于速度太快，测量近程距离很困难，另外，不能检测像玻璃那样的透明物体，但对其他方面具有很多优点。对超声波来说，由于它的传播速度较慢，对上述两个条件比较容易实行。

超声波传感器的应用还是比较多的。在水中应用的实例有声纳和鱼群探测器，利用人体的大部分是由水分构成的事实，已做出了超声波诊断设备。在固体中的应用有了解金属中裂纹或缺陷的探伤仪，在空气中应用的例子有电气仪器的遥控、防盗仪器、邻近开关器（比如超声波汽车倒车保护器等）及测距计和风速计等。

1970 年柏格费德(Bergveld)最初做了如下的实验：把绝缘栅场效应晶体管(IGFET)的栅金属电极取掉，形成厚度约为 200nm 的 SiO_2 膜栅极之后，直接放入 pH4.6 的 NaCl 溶液中时，根据 Na^+ 浓度的不同，观察到了场效应管的漏电流发生变化，接着又发现这个器件不仅对 Na^+ 离子，而且对 H^+ 浓度也有类似的效应。当时柏格费德主张，这种器件在电解液中不使用参比电极也能测定由溶液中的特定离子产生的 SiO_2^- 电解液界面电位，但后来又否定了这种说法。并且，SiO_2 膜在溶液中容易进行水合作用而引起膜的绝缘性被退化引起器件电特性的不稳定。

1971 年松尾等利用与柏格费德相同的器件进行了能够感应出生物体活动电位的基础实验，而后，研制并试制了与溶液不进行水合作用的 SiN 膜栅绝缘膜，证明了它作为触动电极可非常稳定地工作、是很好的 pH 传感器，并发现这种 pH 传感器对 Na^+、K^+ 离子几乎不敏感。他们做的实验和柏格费德实验不同之处在于使用了没有水合作用的绝缘膜及利用参比电极固定了电解液的电位。

1975 年佳那塔(Janata)等人也使用 Si_3N_4 膜制备了 pH 传感器。他们发现，当敏感材料缬氨霉素-增塑剂-PVC 淀积在绝缘栅时，对 K^+ 离子很敏感，而且得出了这样的结论：为了该器件稳定工作，一定需要参比电极。

另一方面，1975 年兰兹洛姆(Lundstrom)试制了 Pd 作为栅金属的 Pd-SiO_2-Si 结构的器件，并发现它对 H_2 和 H_2S 气体很敏感。在这个时候又出现了泽莫(Zemel)的对化学半导体器件 CSSD 进行了最初的解说。后来世界各地都积极进行了这种器件的研究，并取得了可喜的成果。

最初由于场效应晶体管的绝缘膜使用了氧化物 SiO_2，所以常被称为 MOSFET。但是，目前已变成一般化，也就是说，氧化物

绝缘膜不一定是唯一的绝缘膜，因此，它被通称为 IGFET（绝缘栅场效应晶体管）或者 MISFET（金属-绝缘体-半导体场效应晶体管）。如果对离子或气体等化学传感器结合为一体化时，则常被称为 CHEMFET（化学敏感场效应晶体管）传感器。

第七章　半导体材料

固体材料按电阻率的大小，可分为超导材料、导体材料、半导体材料和绝缘体材料。如果再细分，还有半金属材料和半绝缘体材料。

7.1　半导体材料的特点

在地球上，很多物质属于半导体材料。它们的形态也是多种多样的，有晶态的，非晶态的，也有液态的。比如：Bi_2S_2、Sb_2S_3、Cu_2S 等物质在液态下仍然具有半导体性质。

很早以前人们就发现，各种物质的电导率不同。金属材料的电导率都比较大，属导体范围，它们的电导率往往超过 10^4 $(\Omega \cdot cm)^{-1}$，电导率小于 10^{-7} $(\Omega \cdot cm)^{-1}$的物质一般属于绝缘体材料，而电导率介于这两者之间的物质，历史上曾经定义为半导体材料。

但是，随着半导体学科的发展，对半导体性质的进一步了解，证明了上述定义是不够全面的。大家知道，重掺杂半导体锗和硅的电导率已接近 $10^4(\Omega \cdot cm)^{-1}$数量级。可是不能因此说它们是非半导体。另外，在砷化镓中若掺入铬、铁或氧等杂质时，它的电导率实际上已接近绝缘体。

后来，原苏联科学家 A. Ф. 约飞注意到，金属和半导体的区别不在于电导率的大小，而在于电导率的温度关系。随着温度的升高，金属的电导率缓慢降低，而半导体的电导率则急剧增加，这

个观点和1833年法拉第的实验是一致的。约飞还认为，绝缘体和半导体的区别则在于载流子的种类。在半导体中电流是靠电子进行输运的，而在绝缘体中则靠离子进行。根据这个观点可定义为：电导率由电子浓度决定，并随温度升高而增加的物质叫做半导体材料。

现在的很多实验事实说明，约飞的这种定义也是不够全面的。首先，在重掺杂半导体中电导率的温度关系与金属差不多，随着温度的升高而缓慢下降；其次，现在人们越来越对离子半导体感兴趣。因此，对半导体做准确的定义看来是比较困难的。但是，总的来说，半导体最主要的特点是在各种不同外界因素（比如温度、光、电、磁、各种气体及压力等）的作用下，在非常广泛的范围内改变自己的电导率。

半导体的电阻率对其所含的杂质量是非常敏感的。杂质含量的改变，引起载流子浓度发生变化，半导体材料的电导率也发生变化。例如，硅中磷杂质的浓度在$10^{20}\sim10^{13}\,cm^{-3}$范围内变化时，它的电导率则从$10^{3}\ (\Omega\cdot cm)^{-1}$变到$10^{-6}\ (\Omega\cdot cm)^{-1}$。目前电导率可在这样大的范围内变化的半导体材料为数不多，但它说明了半导体中杂质含量是决定其电导率的主要因素之一。

金属和半导体在本质上的差异是：在金属中对电导有贡献的载流子只有导带电子一种，它的数量多，而且迁移率也大。在弱电场下也能得到大的电流密度。而在半导体中，对电导有贡献的载流子不仅有导带电子，还有带有与电子电荷相反电荷的空穴。具有两种不同符号电荷的载流子是半导体的特点。正是由于有两种载流子，所以半导体的导电类型共有三种：即电子为主要载流子的N型半导体，空穴为主要载流子的P型半导体以及电子和空穴数目相等的本征半导体（I型）。在半导体硅中掺入Ⅲ族元素硼时，一个硼原子提供一个空穴载流子。这种空穴和电子一样可以输运

电流，但它的电荷是正的，而且它不像电子那样是实际存在的粒子，而是假想的粒子，并在价带中输运电流。

在一种半导体中，如果使P区和N区相互接触形成一个结，我们把这个结叫做PN结。以PN结为界从受主杂质区突然变成施主杂质区叫做突变结。严格地说，这种突变结实际上并不存在。一般都或多或少地存在着杂质浓度分布梯度，但在合金结中可以实现近似的突变结状态。对在单晶生长中形成的PN结和用扩散法形成的PN结来说，从P区到N区的变化是相当缓慢的，也就是说杂质具有缓变的浓度分布，这种PN结叫做缓变结。

PN结的伏安特性具有整流特性。也就是说通过PN结的电流与所加反向电压几乎无关，而恒等于反向饱和电流。当在PN结上加正向偏压时，正向电流随电压按指数函数关系增加，即正向电阻变小。正是由于利用半导体材料可以做成这种非常奇特的PN结，才使得具有各种功能的半导体器件得到迅速的发展。因此，可以说PN结是半导体器件的核心部分（非结型器件除外），如果半导体材料不具备这种特点，那么它与一般电阻材料也就没有什么区别了。

半导体材料的品种很多，从无机材料到有机材料，其中有元素半导体，也有化合物半导体及其固溶体，化合物半导体中又有二元和多元化合物及其固溶体。在这些半导体材料中，最早做成器件并使用的是元素半导体硒，从1920年左右出现的硒整流器到出现的锗单晶管的近30年间，它一直处在独霸半导体的地位。硒整流器是用硒蒸发膜做的，它是非晶态或多晶半导体材料。它是在其电学性质和它与金属之间的界面特性还不十分清楚的情况下，只靠实际经验来应用于仪器设备中的。硒整流器的特点是，当它一旦达到寿命而被损坏时，就会自动起到与线路绝缘的作用，因此，不会损坏线路中的其他部件。

作为一个完整的单晶半导体材料，最早登上舞台的典型半导体是元素半导体材料锗。锗不但晶体可以制备得很完整，而且所含杂质的浓度也可以控制。因此，人们最早在广泛的温度范围内研究了锗的电学和磁学性质，使半导体在理论和实验两方面都获得了飞速的发展。当时半导体二极管和晶体管的主要材料就是锗，然而到了1955年元素半导体材料硅比较成熟之后，锗很快被硅取代了。其理由是硅材料除来源丰富外，用硅材料做的晶体管的使用温度范围更广，可靠性更高，目前硅已是半导体工业中最主要的材料。恐怕到了二十一世纪这种硅材料在半导体材料中的重要地位也是不会改变的。

人们在元素半导体硅材料之后积极进行研究的是以砷化镓为代表的Ⅲ—Ⅴ族化合物半导体材料。19世纪末作为X线结构分析和热分析的研究对象，化合物半导体已开始使用了。但是，到了1952年西门子的韦克(Welker)首先明确了Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体材料的性质。从此，人们对它们进行了研究工作，并发现有些Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体材料具有独特的性质，比如，1962年做出的GaAs激光器和发光二极管等半导体器件，从而它受到了人们的重视。

其他很多半导体材料的研究还远不如锗、硅和砷化镓那样深入，但它们之中有很多材料具有锗、硅不具备的特性而在某些特殊器件中被使用。目前人们对非晶态材料的研究很感兴趣。总之，各种半导体材料的发展将促进半导体器件的发展，器件的发展及广泛的使用也推动了材料的发展。

7.2 元素半导体材料

在周期表中，金属和非金属元素之间有12种具有半导体性质的元素。它们是硼（B）、碳（C）、硅（Si）、锗（Ge）、灰锡

(Sn)、磷 (P)、灰砷 (As)、黑锑 (Sb)、硫 (S)、硒 (Se)、碲 (Te)、碘 (I) 等。但它们的大多数都是不稳定的，例如，S、P、As、Sb、I 都易挥发；灰锡在低温下才稳定，在室温下就转变成无半导体性质的白锡 (β-Sn)；B 的熔点太高，不易拉制单晶。所以，在它们之中，除 Se 可以做光电池、整流器之外，基本上没有什么实用价值。只有 Ge 和 Si 的性质优越，是当前最广泛应用的半导体材料。就 Si 和 Ge 相比，目前 Si 应用得更广泛，是最典型的元素半导体材料。因此，这里主要介绍它的基本性质。

硅是地球上含量丰富的元素，约占地壳的 27%。硅的来源主要是石英砂 (SiO_2)，另外，在各种矿物中也含有大量的硅酸盐。将石英砂用焦碳在碳电极的电弧中还原可以得到工业硅，它的纯度约为 97%，远不能满足半导体器件的要求，因此，还需要进一步提纯。由于硅的熔点为 1 420℃，而且高温下很活泼，容易与容器反应引入杂质，加上硅中主要杂质硼的分凝系数接近 1 (0.9)，很难用区熔法除去。因此，硅的提纯主要是通过化学方法将它提纯到能满足一般半导体器件的要求。只有在为了满足对纯度要求特别高的器件（比如探测器）中，才在化学提纯后所得到的多晶硅棒上进行区熔提纯。

半导体材料的电学和其他物理性质对晶格缺陷(如位错等)以及所含杂质的种类和数量是非常敏感的。晶粒间界是原子排列周期性的不连续面，杂质的浓度也与晶体内部的结构有关。对多晶体进行各种物理测试时，它们的数字往往与单晶的不同。因此，为了了解物质的固有性质，必须对不存在晶粒间界和晶体缺陷的完美晶体进行测试。

另外，制作各种半导体器件，尤其是集成电路和超大规模集成电路的制作更需要均匀性好而且大直径的完美单晶硅。现在不仅能制造无位错的完美单晶，而且还可以将位错密度控制在一定

范围内的单晶体。无位错单晶硅的直径在20世纪80年代已达到100mm规格化，目前已达到125～150mm硅单晶直径规格化。这样大直径硅单晶重量常常是几千克到十几千克，最重的能达到几十千克。

生长单晶的方法有多种，但基本上可分为：从熔体中的生长法；从溶剂的溶液中生长法；气相生长法。从熔体中生长单晶的方法，根据具体工艺又分为直拉法和无坩埚区熔法。直拉法又被称为乔赫拉尔斯基法，用这种方法生长直径125mm以上的硅单晶是不困难的，单晶长度一般在300mm以上。在这种方法生长的单晶中，径向杂质分布比较均匀，但纵向分布就差些。另外，拉制单晶的熔体直接与石英坩埚接触，引进大量的氧原子及碳沾污。用直拉法生长的单晶一般用于普通硅器件和集成电路的制造，不适合做大功率可控硅等器件，因为它的含氧、碳量高，击穿电压上不去。

用无坩埚区熔法能生长直径100mm，长1m以上的硅单晶。在这种单晶中纵向杂质分布比较好，但径向分布不如直拉法的单晶，因为这种方法生长单晶的熔体不接触任何东西（在真空或保护气体中生长），含氧量低，适于做大功率可控硅等器件。但由于径向杂质分布不如直拉法，制造集成电路等器件一般不太使用区熔单晶。

用气相外延法能够制备质量非常好的薄膜单晶。一般的器件大多制作在这个外延层中，它的厚度和杂质浓度可以任意控制。气相外延法在器件工艺中是不可缺少的一种工艺。

分子束外延法也是一种制备薄膜单晶的新工艺，它的特点是能够制备出晶体完整性好的单晶。然而，和气相外延法一样，不能制备像直拉法和区熔法那样的大块单晶，只能在硅衬底或其他材料衬底上生长薄层单晶。

从硅单晶中的各种杂质来看，碳原子在5ppm（原子）以上时，器件性能会很快老化，在低于这个浓度下也观察到漏电流随着碳原子浓度的下降而减少的现象。硅中的氧在450℃热处理时变成施主，叫做热施主。硅中主要的重金属杂质的分凝系数一般都很小，在10^{-4}～10^{-6}数量级，因此，硅中重金属含量不太高。然而，硅中微量的重金属杂质对器件性能影响很大，人们通常认为这是微量金属杂质在晶体内部的缺陷处，如位错处富集或析出，这对器件性能产生不良影响。

为了满足器件对材料的导电类型和电阻率的要求，在直拉法中采用在熔体中掺杂的方法。在无坩埚区熔中采用的掺杂方法有许多种，我国主要采用溶液掺杂法。除了这些人们熟知的掺杂方法外，也提出了一些新的行之有效的掺杂方法、如离子注入法，中子照射掺杂法等。后一种方法是用中子照射使Si中的同位素Si^{30}直接转变成P^{31}，从而实现Si中掺P的目的。

在完整性方面，使用直拉法、无坩埚区熔法、气相外延法等生长无位错单晶困难不大，尚存在的问题是解决硅中微缺陷的问题。为了研究和生长更完美的单晶，人们在宇宙飞船中进行生长单晶的研究，在这种失重条件下生长的单晶可能会更进一步提高单晶的质量。

由于超大规模集成电路的发展，集成度越来越高，因此，硅单晶中微缺陷的多少决定了材料的优劣。所谓微缺陷，一种是由热力学稳态产生的平衡空位和自间隙原子，在冷却过程中冻结而产生的过饱和，另一种是残留杂质和掺杂在晶体冷却时所形成的化学杂质过饱和。这些缺陷都决定于它们的浓度和饱和度的极限，导致冻结过程形成点缺陷团。这些微缺陷在位错密度较高的晶体中，由于位错的吸附作用而并不明显表现出来，但在无位错的晶体中则很明显表现出来。另外，由于在拉制晶体过程中，因为晶

体旋转所造成的缺陷冻结的周期性而产生漩涡缺陷，它是在无位错单晶中常常见到的。根据缺陷的大小可分为A、B、C三类。已查明漩涡缺陷的产生与碳含量有明显的关系，另一方面，也与晶体原始生长条件有关。在直拉单晶的颈部常见到无漩涡缺陷晶体，在快速生长单晶时，即其生长速度为4～5cm/min时，则可完全控制漩涡缺陷的形成。

从实验中观察到锗和硅的导带等能面是旋转椭圆体。这样，它们的许多性质，诸如电阻率和磁阻效应等显示出各向异性的特性。它们的电子有效质量也分为与主轴垂直方向的有效质量 m_t^* 和与主轴平行方向的有效质量 m_l^*，而且它们不相等。锗的导带底处在 k 空间的〈111〉方向，因此，它具有8个对称的导带，但它们在布里渊区边缘上，与相邻的布里渊区共有一个导带，因此，属于第一布里渊区的导带数为4个。硅的导带底处在〈100〉方向，离 $k=0$ 点约三分之二左右处，因此，它具有6个对称的导带。锗和硅的价带顶都处于 $k=0$ 处，它的结构比较复杂，具有轻空穴有效质量 m_1^* 和重空穴有效质量 m_2^*，对应于它们的能级在 $k=0$ 处是简并的。

由于锗和硅的导带底和价带顶不在同一 k 值处，因此导带和价带之间光学跃迁（电子吸收光或电子空穴复合发光）时需要声子参与才能满足动量守恒的要求。具有这种能带结构的材料称为间接跃迁型半导体材料，以此与GaAs等直接跃迁型半导体材料相区别。直接跃迁型材料的能带结构对于发光器件和激光器件起决定性作用。虽然间接跃迁型材料锗和硅在发光器件和激光器件方面发挥不了它的作用。但由于它们是多能谷半导体材料，在压阻元件、磁阻元件等方面却能发挥它们的长处。

7.3　化合物半导体材料

虽然现在使用最广泛的半导体材料是硅和锗两种元素半导体材料，然而历史上最早发现的半导体材料却是化合物半导体材料。在本章开头已叙述的在1833年法拉第发现了硫化银电阻率的负温度系数特性，以后，人们又发现了PbS、FeS_2等的整流作用以及PbS、SiC、TeSi等是很好的半导体检波器材料。进入20世纪后，随着科学技术的发展，半导体也得到了发展。在一系列实践和理论发展的基础上，1948年出现了第一支锗晶体管，次年又试制成功硅晶体管。从而诞生了年轻的半导体学科。

晶体管的出现一方面推动了锗、硅等元素半导体材料的发展，另一方面也激发了人们去寻找其他的半导体材料，于是从1950年开始了对化合物半导体材料的研究。由于化合物半导体中有些具有元素半导体不具备的特性，因此它引起了人们很大的兴趣。一般来讲，化合物半导体材料的提纯和制备比元素半导体难得多，所以发展较慢，直到1962年GaAs激光器的研制成功和1963年发现GaAs中的耿氏效应之后，化合物半导体才在理论上和制备方面得到了迅速的发展。

化合物半导体有很多种。依据它们的性质、组成、结构等进行分类。如依据组成分为Ⅲ-Ⅴ族、Ⅱ-Ⅵ族、氧化物半导体、有机半导体等；依据结构分为闪锌矿型、无定形（非晶态）、黄铜矿型等化合物半导体；依据性质分为气敏、湿敏、磁性等化合物半导体等。

1. Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体

Ⅲ族元素硼（B）、铝（Al）、镓（Ga）、铟（In）和Ⅴ族元素氮（N）、磷（P）、砷（As）、锑（Sb）互相化合成16种Ⅲ-Ⅴ族化合物。在以Ga为中心的4种化合物GaN、GaP、GaAs、GaSb

中，人们对 GaAs、GaP 化合物半导体材料研究得比较多，应用也比较多。GaAs 的禁带宽度比硅稍大，但由于电子迁移率比硅大 5 倍多，熔点也比硅低一些，并且还具有一些元素半导体所不具备的其他特性而受到人们的重视。GaP 的禁带宽度是 2.26eV，它被作为红光和绿光等发光器件材料而进行研究。GaN 禁带宽度很大，由于可以作为蓝光发光器件材料而受到人们的重视，但因制备困难和自补偿效应，所以发展较慢。GaSb 的晶体是比较容易制备的，但它的禁带宽度和锗差不多，电子迁移率比锗大 1.5 倍，因此，不具有十分诱人的特色。

在铟（In）系Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体中，除了 InN 以外，大都是熔点低、制备不太难的半导体材料，同时具有电子迁移率大的特点，可用来作霍耳元件。InSb 是研究得比较成熟的化合物半导体，它的禁带宽度只有 0.18eV，可应用于红外光电器件和超低温下工作的半导体器件。InP 化合物半导体材料很受人们重视，用它可以制备比 GaAs 更好的耿氏二极管，作为 InGaAsP 四元系激光器衬底材料被大量使用，另外，从禁带宽度的角度来看，InP 也是很好的太阳能电池材料。

硼（B）系Ⅲ-Ⅴ族化合物材料的制备很困难。除 BN 以外，人们对其他的半导体性质还不太清楚。BN 和 BP 等由于禁带宽度过大，在实际应用方面也存在着问题。Al 系Ⅲ-Ⅴ族化合物一般来讲是不稳定的，AlSb、AlP 和 AlAs 等在室温下就与空气中的水反应而分解。AlN 禁带宽度太大（6eV）以及自补偿效应，不易用掺杂的方法控制其导电类型。所以作为半导体材料来应用是困难的。从禁带宽度来看 AlSb 与太阳光的频谱接近，作为太阳能电池材料具有较高的转换率。

利用 Ga、In、Al、B、As、Sb、P、N 可组成 48 种三元系固溶体。但是包含 B、N 元素的固溶体不仅制备上困难，而且人们对

它们的半导体性质的研究也不充分。目前研究比较多的只有 18 种，这些半导体材料实际上是两种二元系 Ⅲ-Ⅴ 族化合物之间的固溶体，它们的性质多半随着组分比的改变而连续地变化。例如，组成固溶体的原始两个二元系化合物分别为直接跃迁型和间接跃迁型能带结构，因此组成的固溶体随着成分不同而分别属于直接或间接跃迁型，而且固溶体的直接跃迁型禁带宽度有可能大于组成固溶体的原始直接跃迁型的二元化合物禁带宽度，这样就可以得到多种性质的半导体材料。在 Ⅲ-Ⅴ 族固溶体中研究得比较成熟的有 GaAsP、AlGaAs、GaInP、GaInSb、InAsP 及四元系 AlGaAsP、InGaAsP 等。

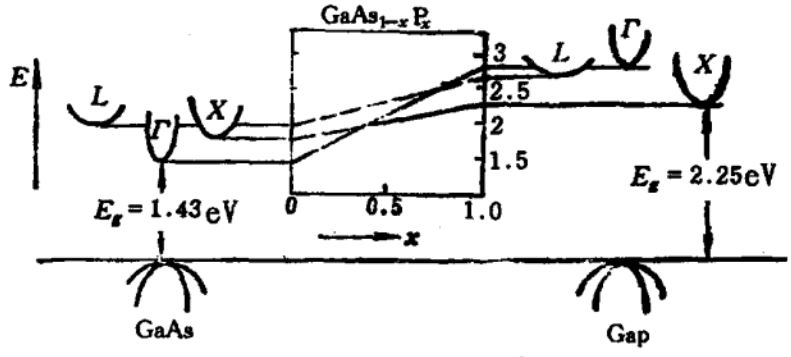


图 2.7-1　三元固溶体 $GaAs_{1-x}P_x$ 能带结构和组分比 x 的关系

Ⅲ-Ⅴ 族化合物半导体自从 1952 年韦克(Welker)研究它们的半导体性质以来，由于它们具有独特的能带结构和性质而得到了很快的发展。在微波器件、光电器件、霍耳器件和红外元件等方面有了广泛的应用。砷化镓的集成电路也在研制，由它制造的计算机的运算速度比由硅集成电路制造的快得多。特别是固溶体材料的发展，为 Ⅲ-Ⅴ 族化合物半导体进一步的应用开辟了广阔的道路。

Ⅲ-Ⅴ 族化合物单晶是从熔体中生长的，它们的生长方法与硅、锗单晶的制备大致相同，有直拉法和横拉法（水平法）。对于

熔化时很少离解的锑化物，可用制备硅、锗单晶的设备，在保护气体下生长。对于蒸汽压大的砷、磷化物则需要适当改变设备和工艺，控制环境，防止熔体分解。对于薄膜单晶通常用液相和气相外延生长法制备。

砷化镓的制备方法主要有从熔体中生长体单晶和用外延的方法生长薄层单晶。GaAs 的熔点为 1 237℃，其离解压强为 0.9 个大气压，而且 As 容易挥发。因此，在制备 GaAs 时，首先遇到的问题是如何合成并保证 GaAs 具有一定化学计量比。在生长单晶时，除了考虑液固相转变外，还必须考虑气相的作用，即如何控制易挥发组分 As 的蒸汽压问题。制备 GaAs 体单晶主要有水平区熔法和液封直拉法。薄膜单晶主要用气相外延或液相外延法生长。

GaAs 器件对 GaAs 材料的要求和硅器件对硅材料的要求相似。为了适应日益发展的器件的要求，砷化镓单晶必须是高纯度或者根据器件要求选择掺杂剂进行掺杂。比如制备掺 Cr 的半绝缘单晶或掺硅、碲的低阻单晶，掺 Zn 的 P 型单晶，以减少与消除晶体中的沉积物、析出物、深能级杂质及位错，控制化学计量比，提高晶体的完整性。

从高温熔体中生长的 GaAs 体单晶，容易引入杂质沾污和产生晶体缺陷，而 GaAs 外延工艺却具有生长温度低、沾污少，能实现可控掺杂、得到任意厚度、完整性和均匀性好的 GaAs 薄层单晶，因此，几乎所有的 GaAs 器件都以外延层作工作层，以体单晶作衬底。对 GaAs 外延的一般要求是减少和消除残留的杂质和深能级杂质，提高外延层的纯度，准确控制外延层中杂质浓度和外延层厚度。消除异型层和减少过渡层的厚度，降低层错和位错密度，控制表面缺陷和结构缺陷，实现可控掺杂，提高杂质的纵向分布的均匀性，进行薄层或多层结构的生长等。GaAs 气相外延的方法有岐化法、热分解法和金属有机化学气相淀积法（MOCVD）

以及分子束外延法（MBE）等。

GaAs 液相外延生长是获得高纯度外延层的一种方法，也是制备室温连续长寿命双异质结激光器及大面积 GaAs 太阳能电池的可靠的方法。砷化镓液相外延的方法很多，按改变熔体中 GaAs 饱和度的方法，可分为降温法（瞬态降温法）、温差降温法和溶剂输运法、电外延法等。在实际应用中主要使用溶剂输运法，又称为稳态温度梯度法。

磷化镓（GaP）是橙色透明的晶体，在室温下禁带宽度为 2.26eV，它是间接跃迁型材料，引入等电子陷阱后其发光效率大幅度提高，且引入不同杂质呈现出不同的颜色，是光电显示器件的重要材料，此外，它还可以用来做光电倍增、光电存储器等器件。GaP 的熔点为 1 470℃，其离解压为 35±10 大气压。因此，若从 Ga 和 P 在高温下直接合成符合化学计量比的 GaP 是很难的。目前主要用高压单晶炉液体密封法技术和外延法来制备 GaP 单晶。

磷化铟（InP）是一种具有沥青光泽的深灰色晶体，熔点为 1 070℃，熔点下离解压为 27.5 大气压，因此，制备体单晶也比较困难。使用高压单晶炉制备 InP 单晶是最主要的方法。InP 谷间电子转移引起的负阻效应比 GaAs 优越。由于长波长光迁通讯技术的发展，并可在 InP 衬底上生长 InGaAsP 双异质结激光器单晶而受到人们极大的重视。

砷化镓的晶体结构是闪锌矿型结构，其布里渊区和金刚石结构的布里渊区相同，但是，两个副格子的原子不相同，一个副格子由 Ga 原子组成，另一个副格子由 As 原子组成，这种结构的化合物半导体没有反演对称性。因此，三度简并的价带顶不一定处在 $k=0$ 的地方，可能有所偏离。但偏离很小，以至在实验中观察不到，所以一般近似地在 $k=0$ 处表示价带顶，因此，在 $k=0$ 点

上最低的导带能谷和最高价带顶相一致，禁带宽度为 $E_g=1.43$eV。具有这种能带结构的半导体叫做直接跃迁型半导体，在这种半导体中价带的电子吸收光子的能量而跃迁到导带时，或者相反，电子从导带落到价带而发光时，电子波函数的 k 值基本上不改变，直接跃迁的特点是没有声子参与，所以使用直接跃迁型半导体材料制作的发光二极管的发光效率很高，这就是首先在GaAs中发现激光效应的原因。化合物半导体中有不少是直接跃迁型材料，如Ⅲ-Ⅴ族化合物中的GaN、InP、InAs、GaSb、InSb等。

磷化镓是间接跃迁型材料，在这种半导体中电子同空穴复合发光时，必须有声子参与，因此，它的发光效率比直接跃迁型半导体低很多。Ⅲ—Ⅴ族化合物中的BP、AlP、BAs、AlAs、AlSb等都是间接跃迁型材料。

元素半导体和二元化合物半导体的禁带宽度是固定的，但三元固溶体和四元固溶体的禁带宽度却是随组分比变化而改变的，这就给半导体器件的制作带来很多有利条件。例如，GaAs的禁带宽度是1.43eV，用它做的发光器件只能发射出红外光，如果想得到可见光，那么需要把红外光转变为可见光的工艺。但是三元固溶体 $GaAs_{0.6}P_{0.4}$ 的禁带宽度为1.91eV，而且是直接跃迁型半导体，因此，用它做的发光二极管能直接发出波长为650nm的红光，而且发光效率也很高。

三元固溶体不仅禁带宽度 E_g 随组分比 x 变化，其他能带 E_x、E_l、E_t 也随 x 而变化，这给器件制作带来有利条件。例如，Ⅲ-Ⅴ族化合物InSb和GaSb，从它们的能带结构来看都不能满足像GaAs那样产生高场畴的微波振荡条件，然而它们的固溶体 $Ga_{1-x}In_xAs$ 在 $x=0.35\sim0.9$ 范围内能满足上述条件而有可能制备微波器件。三元固溶体 $Al_xIn_{1-x}Sb$、$InAs_{1-x}P_x$、$Ga_xIn_{1-x}As$ 等

中都具有类似 $Ga_xIn_{1-x}Sb$ 的特性。此外，在三元固溶体 $GaAs_{1-x}P_x$、$InAs_{1-x}P_x$、$Ga_xIn_{1-x}As$ 中选择适当的 x 值时，能得到不产生高场畴时的高速电子漂移现象的材料，这种材料在制备高速开关器件方面受到人们的重视。

人们对四元固溶体也积极地进行了研究，如对在 InP 衬底上生长四元固溶体 $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$的外延技术的研究。改变组分比 x 和 y，不仅可以改变禁带宽度 E_g，而且还可以改变晶格常数，使四元系外延层与衬底晶格很好地匹配，减少失配位错，从而提高发光效率，增加激光器的寿命，另外，对 GaAsSb 和 GaAlAsSb 的异质结等也正在研究。预期这类材料在光电器件和微波器件方面会做出一定的贡献。

2. Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体

Ⅱ族的 Zn、Cd、Hg 与Ⅵ族的 S、Se、Te 所组成的化合物为Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体。除了 CdTe 等少数材料外，由于自补偿效应，用掺杂的方法控制导电类型比较困难，有些材料只能得到一种导电类型的材料，因此，制备这些材料的 PN 结型半导体器件是不太容易的。虽然它们的单晶用种种方法是可以制备出来的，但生长速度一般都比较慢，因此，它们之中多数是以粉末或蒸发膜的状态应用的。Ⅱ-Ⅵ族的固溶体最引人注目的有 HgCdTe、HgZnTe 等。

Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体的研究和实用比元素半导体和Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体都早。但它们的研究却还不怎么深入，还有很多不清楚的问题。这些化合物具有禁带宽度大和离子键成分大及直接跃迁型能带结构的特点，它们之中有的是荧光体，有的是电场发光和感光材料。在固体发光、激光、红外等器件方面得到了广泛的应用。

但是，Ⅱ-Ⅵ族化合物的熔点比较高，它们的两个组成元素都

具有比较高的蒸汽压，因此，制备符合化学计量比、完整性好的Ⅱ-Ⅵ族化合物单晶是比较困难的。晶体内部点缺陷数量比较大，在不同环境下进行热处理时，电阻率等性质有很大的变化。所以，在进行热处理时，必须考虑固相中晶格缺陷的活度与气相活度之间的平衡关系。由化学计量比的偏离而产生的晶格缺陷可作为施主或受主引起电阻率的变化。同Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体一样，掺入组分元素以外的元素替代组分元素时也形成施主或受主。

到目前为止，人们所了解的Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体都属于直接跃迁型。因此，在Ⅱ—Ⅵ族三元固溶体半导体中看不到直接跃迁的禁带宽度和间接跃迁的禁带宽度之差别，但是存在禁带宽度达到极小值的固溶体。

在上述Ⅲ-Ⅴ族、Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体之外，还有黄铜矿型半导体Ⅱ-Ⅳ-$Ⅴ_2$、Ⅰ-Ⅲ-$Ⅵ_2$以及Ⅱ-Ⅴ族化合物ZnSb、CdSb，Ⅲ-Ⅵ族化合物InSe，Ⅴ-Ⅵ族化合物Bi_2Te_3、As_2Te_3以及Ⅳ-Ⅵ族固溶体PbSnTe和PbSnSe等也都具有半导体性质，有的已被应用。另外，许多金属氧化物、硫化物也属于化合物半导体材料。

7.4 其他半导体材料

1. 非晶态半导体

在前面介绍的半导体材料大部分都是晶体材料，但在非晶态材料中有一些在常态下是绝缘体或高阻材料，当它们在外界条件下，如电场、光、温度等的作用达到一定值时，呈现出半导体电性能，这些材料被称为非晶态半导体材料。这种材料由于具有开关和记忆效应很受人们重视，另外它还具有开关时间短、耐辐射、开关两态电导率差别大、噪声小、易小型化、材料制备容易、价格便宜等优点。但由于存在弛豫时间长、器件的稳定性、可靠性、重复性等比较差，材料的合成和性能的控制比较困难，开关和记

忆的机理也不十分清楚等原因，在应用上还有不少困难。为了克服这些困难，人们在开关元件、记忆元件、固体显示、热敏电阻、太阳能电池等方面的应用展开了研究，并取得了一定进展。

非晶态物质是与晶态物质相对而言的。晶体是原子按一定规则，周期性排列的长程序固体，非晶态却不是这样，原子排列没有规律，从长程看杂乱无章，但短程是有序的，有时也叫做无定形物质。玻璃是典型的非晶态物质，因此，非晶态半导体也称为玻璃半导体。非晶态半导体也不能与多晶半导体混为一谈，因为多晶体毕竟是属于晶体物质的。

制备非晶态物质的方法比较简单，一般只要在高温下把熔融状态的物质急速冷却时，就可以得到保持熔融状态结构的非晶态固体。然而并不是所有的物质都可以用这种急速冷却的办法得到非晶体。在各种物质中，用上述方法有容易形成非晶态的物质，也有不易形成非晶态的物质。最容易形成非晶态物质的有：氧化物玻璃，比如，$(B_2O_3)_{32}(BaO)_{20}(V_2O_5)_{48}$、$(B_2O_3)_{20}(CaO)_{10}(Cu_2O)_{70}$等和硫硒碲玻璃，如把 Ge、Si、As、Te 按不同比例混合制成材料等。此外，硅、锗等Ⅳ族元素半导体和化合物半导体以及某些金属物质也可以得到非晶体。

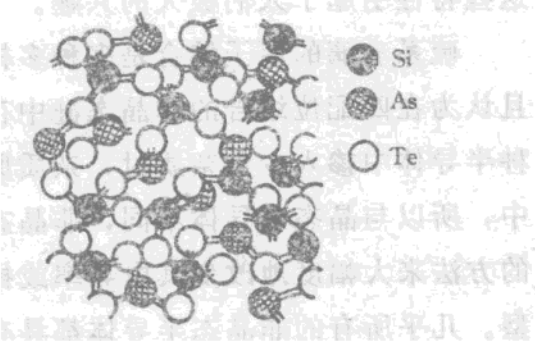


图 2.7-2　$As_1Si_1Te_3$ 非晶态半导体的原子结合模型

在不具有长程序排列的非晶态半导体中，虽然各个原子的配位和取向无规律，但它们结合时价电子却无一遗失，因此，非晶态半导体是在原子间结合中储存的内能比晶态高的状态下形成固

态的。正是由于其内部各元素的原子间结合形式的多样性和原子位置的不规则性造成了它不具有像晶体那样的固定熔点，只是存在一定温度范围内软化的软化温度，同样也不具有晶体那样由于原子排列所引起的表面效应和解理性。另外，非晶态原子的络合网状结构，一般来讲与同一种材料的晶体相比机械粘性和抗力都大。基于这样的物理性质，它像玻璃似的易于加工成型，又容易形成薄膜。这种薄膜与晶态半导体比较，不易产生龟裂和蜕皮。热处理时也不易产生针孔等缺陷，抗酸性能强，与金属接触导电性能好，不易受环境的影响，而且便于批量生产，非晶态半导体的这些特性引起了人们极大的兴趣。

硫系玻璃的原子结合是多种多样配位和取向的络合网状，并且认为在四配位结合的非晶态硅中存在很多悬挂键。因此，在这种半导体中掺入少量杂质时，杂质原子就进入原子价不足的结合中，所以与晶态半导体不同，非晶态半导体不能用掺入微量杂质的方法来大幅度地改变其电导率或掺入不同杂质来控制其导电类型。几乎所有的非晶态半导体都具有本征半导体的性质。

非晶态半导体的原子排列不是长程序的，因此，不能直接应用能带论。但是从电学性质和光学性质的测试中看到它存在着一定的激活能，也观察到了光吸收光谱的本征吸收限以及好像带间跃迁的能级。作为特殊的例子，在非晶态金属中，由于其电导率也具有一定的激活能而显示出半导体性质。基于这些实验事实，人们对非晶态半导体进行了相当于晶态半导体能带理论的状态密度函数的理论研究。

上面已经说过，非晶态半导体具有本征半导体的性质，它的直流电导率具有一定激活能的形式变化。从这个激活能求出的禁带宽度 E_g (el)，不像晶态半导体那样与光吸收带边能相一致。通常光吸收带边显示出比激活能求出的禁带宽度低 10%～20%的

能量。另外，在 $Si_xAs_yTe_z$ 系非晶态半导体中测出的直流电导率 σ_{DC} 和交流电导率 σ_{AC} 显示，它们之间也有差别。温度越低，σ_{AC} 越明显地比 σ_{DC} 大得多。为什么有这样的差别呢？一般认为，非晶态半导体，除了能带中载流子导电以外，还可能存在载流子通过禁带中的高密度局部能级间跃迁而导电，所以产生 σ_{AC} 和 σ_{DC} 的差别。跳跃导电时的迁移率比能带导电迁移率小很多，因此，在高温下，能带中存在着足够多的热激发载流子，这时能带导电占优势，但在低温下能带中的载流子浓度变小，所以通过局部能级间的跳跃导电明显起来。E_g (el) 相当于能带中载流子导电开始的状态密度之间的能量差，因此，把 E_g (el) 称为迁移率禁带宽度。另外，局部能级和能带之间以及局部能级和局部能级间的跳跃可能的光吸收带边能比 E_g (el) 低的原因是可以理解的。这种模型以提出者的名字命名为莫特-CFO 模型 (Mott-Cohen-Fritzsche-Oveshinsky)。

非晶态硅 (a-Si) 的发展是非晶态半导体研究中最重要的一部分。以前非晶态硅都是高阻材料，无法用掺杂法使它的电阻率降低以及改变它的导电类型，因此，在使用上受到了很大的限制。1975 年用辉光放电法分解 SiH_4 制备非晶硅，形成氢化非晶硅 (a-Si：H)。氢原子与非晶硅中的悬挂键结合而降低了悬挂键密度，原非晶硅中悬挂键的密度约为 $10^{20}cm^{-3}$。因此，在迁移率禁带宽度中含有相同数量的局部状态密度，而一般掺杂浓度约在 10^{17}～$10^{18}cm^{-3}$ 之间，所以，在非晶态硅中掺杂是无效的。如果用 H、F 或 Cl 等一价元素与悬挂键结合，则局部状态密度显著下降到 $10^{17}cm^{-3}/eV$，这样就可以用掺杂的方法控制导电类型及电阻率。氢化非晶硅的掺杂是非晶硅材料在技术上的突破，从而扩大了非晶硅的应用范围。非晶硅氢化以后，它的禁带宽度将随着氢化程度的不同而有所变化，带宽可在 1.2～1.8eV 之间变化。氢化非晶硅在

实用上与硅单晶相比有它的优缺点，在考虑应用时应扬长避短。它的优点是禁带宽度及光吸收系数较大，缺点是迁移率及扩散长度较小，因此，非晶硅用于光学器件比电学器件的优越性要大，例如，作为光传感器、电子复印、摄像器等方面，尤其是用非晶态硅作太阳能电池应用很广。非晶硅太阳能电池已商品化，为大规模直接把太阳能转变成电能开辟了道路。

2. 磁性半导体

磁性半导体大体上分为铕的氧、硫、硒、碲化合物 EuO、EuS、EuSe、EuTe 和尖晶石结构的化合物 $CdCr_2Se_4$、$HgCr_2Se_4$ 等两大类。这些材料不同于一般半导体材料，它们的电学和光学性质随磁场变化显出异常现象。EuO 在 70K 温度以下表现出强磁性，其余的化合物在低温下也表现出强磁性或者反磁性。Eu 的氧、硫、硒、碲化合物具有 NaCl 型晶体结构。

铕（Eu）是一种稀土元素，它的原子外层电子排布是 $4f^7 6s^2$。在 14 个 f 状态中电子只占 7 个状态，因此，Eu 的原子具有 $7\times 1/2$ 的自旋以及对应于它的磁矩量，由于 $4f$ 电子的局部性很强，所以 Eu 的氧、硫、硒、碲化合物成为强磁性或反磁性体。通常情况下，Eu 的上述化合物是绝缘体。所以从可见光到近红外具有透明区域，从紫外光到可见光区域表现出吸收特性。EuO 在光子能量为 5eV 及 2eV 附近有吸收带。但这个低能量吸收带的吸收限随着温度变化和样品的磁化而敏感地变化。Eu 的氧、硫、硒、碲化合物在低温下出现强磁性或者反磁性的同时，电阻率发生异常现象。比如，在 EuO 中，电阻率随着温度的下降而增大，并在居里温度 T_c 附近最大，在 T_c 温度以下时电阻率急剧减少以及在 T_c 温度附近加磁场时电阻率减少，即出现负磁阻效应等现象。

尖晶石型磁性半导体随着温度的下降，吸收光谱限显著地向长波段或短波段方向移动。比如，$CdCr_2Se_4$ 在室温下的 2.15eV 和

1.85eV 两个强吸收峰，随着温度的下降向短波段移动，而 $CdCr_2Se_4$ 室温下的 1.32eV 吸收限，在居里温度附近明显向长波段移动，掺入杂质 In 的 $CdCr_2Se_4$ 的电学性质和 EuS 的特性相似。对这些磁性半导体所显示的光学和电学性质的特异性，只能做定性的说明，详细的解释及其应用则有待今后的研究才能做到。

3. 有机半导体

最初人们是在无机物质范围内寻找半导体材料的。在这个过程中，自然想到在有机物质范围内能否找到具有半导体特性的材料。经过研究发现有机物中确实存在着具有半导体特性的物质，我们称它为有机半导体。

有机半导体大体上分为如下两大类：一类是分子结构中具有碳原子的 π 电子芳香族化合物，例如，苦味酸联氨、四氢化蒽四硫黄酸等；另一类是称为电荷转移络合物的化合物，例如，紫蒽酮、TCNE、蒽缔蒽醌、TCNE 等。属于这两类的有机半导体材料的电阻率随温度的变化形式与无机半导体材料的电阻率变化形式相同。也就是说，随着温度的上升，电阻率下降，而且具有一定的激活能 ΔE，故称之为有机半导体材料。

属于第一类的几种有机半导体材料，通过在真空中进行热处理除去其中的氧原子时，电阻率变高，激活能变大，这说明它们的导电机构发生了变化。这种现象表明在这些有机半导体中的氧原子起着很像无机半导体中的杂质那样的作用，一般来说，这类有机半导体的电阻率比较高。

一些有机化合物和其他物质混合时，它们之间发生电荷转移现象。这样的有机材料属于第二类，称为电荷转移络合物有机半导体。例如，周期表中Ⅳ族元素碳左边的从Ⅰ族到Ⅲ族元素容易放出电子，而在右边的Ⅴ到Ⅶ族元素则容易接受电子。因此，以碳原子为主体的有机材料和这些元素混合在一起时，就发生电荷

的移动而形成与基质材料不同的电学性质。另外，在有机材料中引入置换基时，也产生电荷移动现象。比如引入（—CN）基时，它容易接受电子，而引入氨基时容易放出电子，因此，把这两种置换基混合起来也可以形成络合物材料。利用上述方法制备的有机电荷移动络合物，可分为分子化合物和自由基盐两大类。在分子化合物材料中主要是以易受电子和易放电子的元素或置换基的结合状态为主，并在基态时有非化学结合结构的情况和取电荷移动结构的情况。对导电性来说，后者比前者好得多。

在自由基盐中有阳离子自由基盐和阴离子自由基盐。目前认为在这种盐的同一种离子自由基之间，或者自由基和其中性分子之间会产生很强的电荷移动而显示出高导电性。由于温度作用，在有机半导体中形成激子，这些激子上的电子被光等外来因素作用激发到导带而形成载流子，然而对于这些载流子在晶体中以什么样的机理运动等还有很多问题不清楚。有机半导体中载流子的迁移率大约等于 $10cm^2/V \cdot s$，比如，铋的电子迁移率为 $1.2\times 10cm^2/V \cdot s$，空穴迁移率为 $3\times10^{-1}cm^2/V \cdot s$。利用无机半导体的能带论，以及适用于 EuC 等的跳跃模型理论都不能完满地说明有机半导体载流子的这种低迁移率现象。

由于有机半导体材料中载流子的迁移率比无机半导体中的小很多。因此，它在与迁移率有关方面的应用上明显受到限制，只好在与迁移率无关的光电子学方面发挥它的特点。在有机半导体中也有表现出光电效应、光电导效应、光生伏特效应、热电效应、压电效应、整流作用等与无机半导体相同的现象。例如，三苯基甲烷系染料苯二蓝素具有光电效应的性质，光电流和暗电流之比为 $10^2\sim10^3$，量子效率为 0.1 左右。紫蒽酮·Cs，四氰化铋·Cs 具有外光电效应，光波长为 250μm 以上时其最大量子效率为 $10^{-2}\sim10^{-1}$左右。在 CdS 和有机半导体形成的结具有光生伏特效应，N

型结时产生 0.52eV 的电压，如果 Li-铋-SnN_2 玻璃的 P 型结时产生 0.3～1.0V 的光生电压，另外，六次甲基四胺有机半导体材料具有介电效应，比如，当不施加电场时的折射率为 n_0，施加电场时的折射率变化为 Δn 时，有 $\Delta n/n_0^3E=4.18\times10^{-10}$cm/V 的关系。另外，电荷移动有机半导体和聚乙烯萘有机半导体具有热电效应。前者的塞贝克系数为＋1.5mV/℃，后者的为＋2.3～2.7mV/℃。间苯二酚有机半导体具有压电效应，异紫蒽染料有机半导体则具有压阻效应。电极（Pt 或 Cu）·苯二甲兰素·电极（Ag）结构具有整流特性。

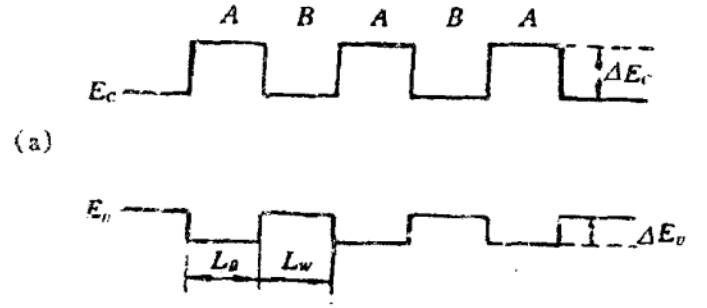
第八章　半导体超晶格

8.1　什么是超晶格

自从 1970 年美国 IBM 公司的江崎（1958 年隧道二极管发明者）等最初提出超晶格材料的新功能特征之后，利用分子束外延法（MBE）制备出 GaAs/AlGaAs 系半导体超晶格以来，随着超薄膜制备技术的发展，超晶格结构的研究获得了很大的成绩，超晶格材料具有一般半导体材料不能实现的特殊功能，是一种新功能材料的代表，特别是 GaAs/AlGaAs 系超晶格材料，由于对它们单晶生长、物理性质的控制都比较容易，两者的晶格常数很接近、材料性质比较类似等原因，科学家们对它们的超晶格结构进行了积极的研究，并在基础理论、实验结果上以及在器件方面的应用等方面都取得了不少成果。

晶体的晶格通常具有由构成原子特性而决定的周期性，一般用晶格常数表示其周期性的长短。但是，半导体超晶格材料是由两种不同性质的薄膜相互交替生长而形成的多层结构的晶体，在

这种半导体超晶格中，由于人们可以任意改变薄膜的厚度控制它的周期性长度，一般来说，它的周期长度比各薄膜单晶的晶格常数大几倍或更长，因而才享有超晶格的名称。这里所说的薄膜性质，如果禁带宽度不同时，叫做组分超晶格，如果P型或N型等薄膜的导电类型不同时，则叫做掺杂超晶格。



超晶格结构能带不连续 ΔE_C、ΔE_V 及势阱宽 L_W、势垒宽 L_B

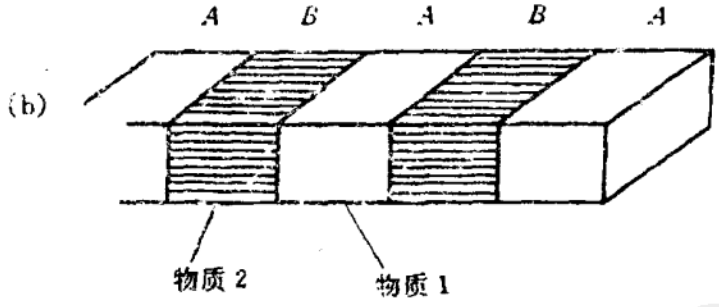


图 2.8-1 组分超晶格示意图

半导体超晶格材料的晶格周期性是按人们的要求任意改变的，因此，对其中运动的电子或空穴附加了人为的新周期势，也就是说，电子波函数本身可被人们所控制，这一点是从未有过的新特征。从这个意义来说，超晶格材料是新的人工物质。除了超晶格材料的周期以外，根据量子势能，可以做出几乎理想的二维

电子系，这种低维电子系在异质结或MOS结构界面中产生新的物理现象，比如，量子霍耳效应、分数量子霍耳效应、二维激子的形成等。这些都开辟了物理学上的新研究方向，另外，目前正在积极进行超高速器件、高电子迁移率晶体管（HEMT）、半导体量子阱激光器等的超晶格和二维电子系器件的应用研究。现在超晶格材料的制备技术已达到了控制误差在一个原子层以内的高精度水平，从材料的品种来说，除了开始时研究的GaAs/AlGaAs系以外，还在对Ⅲ-Ⅴ族、Ⅱ-Ⅵ族、Ⅳ-Ⅵ族以及元素半导体Si和Ge等的超晶格进行积极的研究。

8.2　半导体超晶格类型

1. 组分超晶格

半导体的能带结构一般由以下几个参数表示：表示电子亲和势的χ、表示禁带宽度的E_g、表示价带顶的E_U、表示导带底的E_U、表示真空能级的E_0、表示电子能量的$E(k)$等，这里k表示电子的波矢。

如果当两种不同种类的半导体薄膜相互交替生长而形成超晶格时，一般来说，它们的电子亲和势和禁带宽度都不相同。如果超晶格材料的一个重复单元中由不同材料的薄膜所构成，则称它为组分超晶格。

在组分超晶格中，由于构成超晶格的薄膜材料具有不同的禁带宽度，在异质界面处发生能带的不连续，由不同材料的电子亲和势差可确定导带不连续的能量值ΔE_U。然后再考虑禁带宽度，就可以确定价带的不连续值ΔE_U。根据这些不连续的特点，可将组分超晶格分为若干类型。例如，电子亲和势为χ_A、χ_B，当禁带宽度为E_g^A、E_g^B的两种半导体A和B形成组分超晶格时，如果满足$\chi_A>\chi_B$，$\chi_A+E_g^A>\chi_B+E_g^B$条件，则把这种能带结构的组分超晶格

系称为第一类型超晶格。由 GaAs 和 AlGaAs 形成的超晶格属于第一类型超晶格。

有些超晶格的能带结构与第一类型的不同。一种半导体的导带和另一种半导体的价带相重叠，这种超晶格被称为第二类型的组分超晶格。由 InAs 和 GaSb 形成的超晶格相当于这种能带结构。

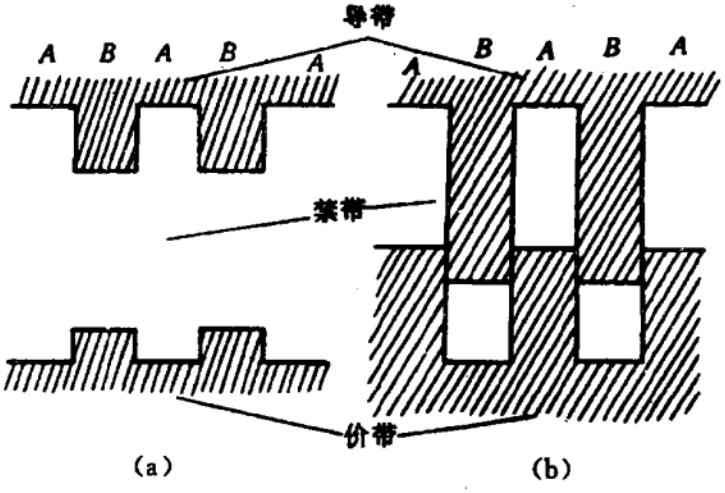


图 2.8-2 组分超晶格能带结构

(a) 第一类组分超晶格 (b) 第二类组分超晶格

在第一类型超晶格中，两种半导体的导带之间或价带之间的相互作用是重要的。但是，对第二类型超晶格来说，两种半导体的导带和价带之间的相互作用是本质的。可以预想到在第一类型和第二类型超晶格中，它们的电子状态有很大的区别。比如，第一类型超晶格为半导体，但在第二类型中就有从半导体向半金属相转移的现象，除了上述两种类型的组分超晶格之外，还有 HgTe/CdTe 结构的第三类型超晶格和重复单元由三种以上半导体材料构成的多元型结构超晶格等。

2. 掺杂超晶格

在同一半导体材料中，用交替改变掺杂类型的方法构成的半导体超晶格叫做掺杂超晶格。比如，在 Si 材料中形成很薄的 N 型层和 P 型层交替生产多层结构的超晶格就属于掺杂超晶格。除了组分超晶格和掺杂超晶格之外，还有应变超晶格、非晶态超晶格等，对于它们的详细情况将在后面详细进行介绍。

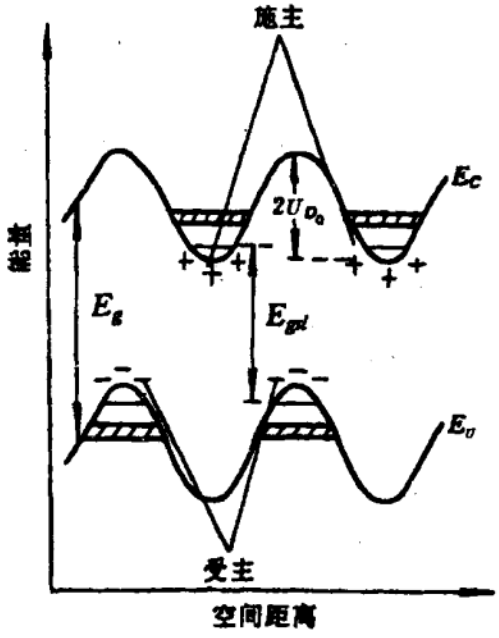


图 2.8-3　GaAs 掺杂超晶格

8.3　半导体超晶格结构的特征与效应

不论哪一种超晶格，在价带和导带或者其中之一形成势阱时，我们根据量子力学知道，在这个势阱中电子的本征能级 E_n 与势阱宽度 L 有反比关系。随着 L 的减少，各能级将被分离，形成量子化的子能带，超晶格的很多独特性质大都是由量子阱和子能带引起的，比如说，改变势阱宽度 L 时，也就是适当控制薄膜层厚度

时，其子能带的能级将发生变化，导致有效禁带宽度变化。另外，由于电子被量子阱所限制而形成二维电子气，在异质界面方向上的载流子迁移率有可能提高。除此而外，在超晶格中具有很多基于量子效应的特征，比如，电学特性方面有载流子迁移率的提高、负阻现象、载流子浓度的增加、载流子寿命的提高等。在光学特性方面有电控制反射率、电控制透射率、光学禁带宽度的变化、折射率的改变、跃迁过程的变化、发光模式的单一化和分化等。

如果交替生长的薄膜厚度比较大，那么量子阱和子能带就不明显，甚至消失而不能起超晶格的作用，只能表现出两种禁带宽度不同的异质结现象。因此，要获得超晶格材料，需要具有能够生长数十原子层厚度以下的薄膜或者单原子层厚度的超薄膜以及它们的多层结构的晶体生长技术，利用分子束外延法（MBE）和有机金属化合物化学淀积法(MOCVD)成功地制备了高质量的各种超晶格材料，后来又发现 MBE 法和 MOCVD 法相结合的 MOMBE 法是更为理想的生长超晶格材料技术，从而受到人们的重视。

从量子阱的形成及其量子化子能带出现的角度来看，在单一的超薄膜的双异质结中也可以实现量子阱。因此，从广义的含意义来说，超晶格材料有时也包括单一的超薄膜双异质结及不具有比普通晶格常数更长周期性的多层薄膜结构材料，只是用超晶格结构名称加以区别后者而已。目前，除了半导体超晶格外，对其他的超晶格材料也在积极进行研究。

在上面已经指出，膜厚为数十纳米以下的半导体超晶格结构具有很多与厚膜不同的电学和光学性质，下面较详细地介绍超晶格材料的新功能。

1. 载流子迁移率的提高

在 GaAs/AlGaAs 超晶格材料中，利用调制掺杂技术，只在

AlGaAs 薄膜层中掺杂，而 GaAs 薄膜层中则不掺杂。如果杂质为施主时，电子从 AlGaAs 的导带向能量更低的 GaAs 导带中转移，并形成只沿界面方向运动的二维电子气，在这种超晶格材料中，由于电子和电离施主在空间上完全被分离，电子则不受电离施主的散射作用。因此，在电离杂质散射起主导作用的低温下，GaAs 中的载流子获得非常高的迁移率。在 77K 温度下，这种超晶格材料中的电子迁移率已达到 $2\times10^5 cm^2/V\cdot s$，而在 4.2K 温度下已达到 $1.5\times10^6 cm^2/V\cdot s$。另外，在 GaAs 中二维电子寿命的增加自然是可以理解的了。

2. 隧道效应

如果 AlGaAs 的膜厚很薄，比电子的德布罗意波长小时，根据隧道效应，电子可以穿透 AlGaAs 的势垒而自由运动，这样，在与两种材料界面垂直的方向上形成子能带，这种子能带表示出很强的非抛物线性，从理论上推断可能产生由负有效质量而引起的负阻现象。

3. 状态密度

从理论上可以计算出二维能带中二维电子气的状态密度，即单位面积中的电子状态数。从理论计算的公式中可以看出，由于每个二维能带的状态密度与能量无关，因此，对一系列子能带累计的状态密度具有阶跃状特性，状态密度的阶跃状决定了超晶格材料的很多光学特性，比如，光学吸收谱与状态密度成比例，所以在超晶格材料中的光吸收谱呈现阶跃形状等。

4. 异质结面中载流子的实空间跃迁

在调制掺杂 GaAs/AlGaAs 异质结中，GaAs 表面的高迁移率电子，沿界面加速时，随着能量的增加，热电子越过界面的势垒向 AlGaAs 中扩散，这种现象叫做载流子的实空间跃迁。载流子实空跃迁的特点是，跃迁时间由器件中与异质结界面垂直方向流动

的电子渡越时间所决定，因此，根据晶体的薄膜化可望得到器件的高速化功能。另外，由于电子向低迁移率的 AlGaAs 层中扩散，伴随着载流子的实空间跃迁，在电流电压特性中会出现微分负阻现象。因此，用这种超晶格材料可望做出微波器件。

5. 量子阱中激子的稳定化

在超晶格结构的量子阱中激子结合能 E_x 的增大是量子尺寸效应之一，在量子阱中形成激子的电子空穴对在薄膜厚度方向被压缩而减少它们之间的平均距离。从而增加结合能 E_x。随着薄膜厚度的减少，量子阱中的激子结合能 E_x 比体单晶中的增加 4 倍左右。因此，在 GaAs 体单晶中只在极低温度下能观察到的激子吸收谱线，在 GaAs/AlGaAs 超晶格量子阱中则可在室温下也能明显地观察到。这种激子吸收与超晶格材料中的电场效应和非线性光学效应的增强有关系。

6. 半导体超晶格材料的金属化

为了寻求新的功能材料，人们曾经研究出金属材料和金属材料相结合而形成的化合物半导体功能材料。比如，以 GaAs 为代表的Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体、Ⅲ-Ⅴ族多元化合物固溶体、Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体以及其他的一些化合物半导体。但是，在半导体和半导体相结合而形成的超晶格材料中有的可能成为半金属材料或者高温超导材料，这引起了人们的极大兴趣。如上所述，在第二类型超晶格半导体的 InAs 和 GaSb 两种半导体材料构成的材料中，GaSb 的价带顶位于 InAs 的导带底之上而形成空间上电子和空穴被分离的半金属材料。在超晶格材料中除了上面的几个典型的功能之外，还有很多独特的性质。我们对这些性质将结合具体的应用进一步介绍。

8.4　半导体超晶格的应用

上面所叙述的超晶格材料表明，我们在电子波长和平均自由程（10nm）范围内的空间中，有可能设计和控制对电子和空穴的势能。在这样的微观势场变化中，电子状态的量子化和势垒中的隧道效应等表现出超晶格结构新的多种物理性质。因为这些物理性质不仅与材料有关，而且还与薄膜厚度等结构参数有很强的依赖关系，因此，对器件的设计有很大的自由度。在超薄膜内二维电子气独特的电学和光学性质，使我们有可能做出新的功能器件。

1. 超晶格在传感器方面的应用

从传感器功能材料的角度来看，超晶格材料具有非常多的传感器功能，下面列举与传感器有直接关系的超晶格功能材料的应用。

(1) 平面掺杂势垒光探测器 (PDB)。它由单一的半导体形成。两端形成重掺杂 N^+型的电极，中间非常窄的部分为平面重掺杂的 P^+层，它的厚度约为 6nm 左右。在这种结构的器件中，能带结构形成三角形的势垒。利用这种结构做的光电二极管，其光电流的增益大到数百，尤其是对弱光增益很大，而且响应速度小于 600ps。

(2) 超晶格雪崩光电二极管 (APD)。在超晶格雪崩光电二极管中有纵向型和横向型两种。横向型 APD 的能带结构具有锯齿状，是通过连续改变 Al 成分而做出的 AlGaAs/GaAs 超晶格材料。这种光电二极管的工作原理是，当能量高的 AlGaAs 导带中的电子落入能量低的 GaAs 导带中时引起雪崩现象而进行电子的倍增。由于电子的能量差 ΔE_U 比空穴的 ΔE_U 大，因此电子的倍增比空穴的倍增大，也就是当雪崩倍增时，电子的电离系数 α 和空穴的电离系数 β 的比值应该大于 1，即 $\alpha/\beta>1$，这样就能改善器件的

稳定性和响应速度。已经在厚度为 50nm 的 GaAs 和 50nm 的 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 的超晶格光电二极管中取得了 α/β 近似于 10 左右的成果。

在纵向型超晶格雪崩二极管中，空穴的通道和电子的通道是被分离的，而且空穴通道是宽禁带，电子通道是窄禁带。由于窄禁带中的雪崩容易产生，所以电子的电离系数远大于空穴的电离系数，也就是 α/β 变的很大。从理论上的计算来看，在 InGaAs 和 AlGaAs 的超晶格光电二极管中可得到 α/β 近似于 10^3 的结果。

(3) 双重隧道势垒器件。两边以约 5nm 厚的 AlGaAs 薄膜和中间约 4nm 厚的 GaAs 薄膜可形成双重隧道势垒器件。电子隧道穿过 AlGaAs 势垒层之后，在 GaAs 量子阱层中与其量子化能级进行共振而通过，然后在隧道穿过第二个 AlGaAs 势垒层。因为电子通过中间层 GaAs 时必须产生共振现象，所以只有产生共振时才有电流通过。如果把 GaAs 层的量子阱作为栅极，用栅偏压控制量子化能级时，在电流电压特性中出现负阻特性。由于这种器件的响应速度非常快，该器件在亚毫米波 (119μm，2.5THz) 的变频和检波方面可以应用。以前只是在低温下 (25K) 观察到了这种负阻伏安特性。但随着分子束外延法等生长技术的高度发展，最近在室温下也已观察到了这种负阻伏安特性。

(4)CHIRP 超晶格器件。为了得到产生负阻现象的伏安特性，日本提出了 CHIRP 超晶格器件。它的结构是从发射极到集电极之间，超晶格结构的周期逐渐变短，在这种器件上施加偏压时，从发射极发射的电子通过隧道效应穿过子能带的禁带而形成电流。但在某一电压下，由于子能带的禁带下降，电子被反射回来而不能通过，出现负阻现象，这种器件利用了具有数原子层厚度超晶格材料的最大特点，对今后的超晶格器件指出了一个方向。

2. 高电子迁移率晶体管（HEMT）

在前面已说过，由调制掺杂超晶格结构中形成的二维电子气，在低温下具有非常高的电子迁移率。把利用这种电子的高迁移率特性，在场效应晶体管中的工作层做成调制掺杂超晶格结构而形成的高电子迁移率晶体管缩写为 HEMT。

首先有希望做出的器件是低噪音微波晶体管（约 70GHz）。虽然调制掺杂而得到的二维电子气的供给能力有其上限（$\leqslant 1\times10^{12}$ cm^{-2}），但利用分子束外延技术可做成多层化沟道高功率器件。

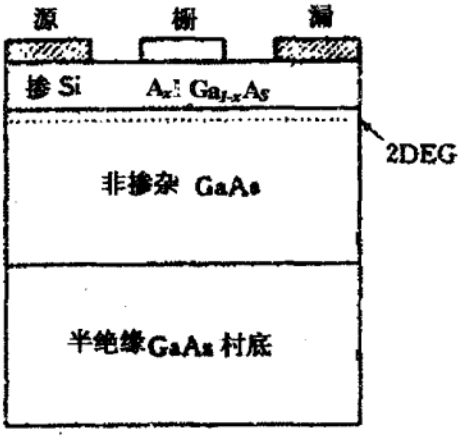


图 2.8-4　HEMT 的基本结构

HEMT 在大规模集成电路方面的应用正在发展之中，已研制出 4K 位 SRAM。然而与 MOSFET 比较，还看不出它有明显的优越性。为了解决这个问题，正对分子束外延法中表面缺陷的控制、晶体管栅极结构的微细化等方面进行进一步的研究。同时也提出了 GaAs（栅）和非掺杂 AlGaAs（栅绝缘膜）超晶格的 MIS 结构方案以及利用二维空穴气高迁移率特性的互补型电路等多种技术，并正在积极进行研究。

分子束外延技术的进步解决了调制掺杂 InAlAs/InGaAs 超晶格结构材料的形成，这个材料比 AlGaAs/GaAs 材料具有更好的速度渡越效应、更高的二维电子气密度、更低阻的欧姆接触等特性，因此有可能做出更高速的场效应器件。

3. 量子阱激光器

用两个宽禁带半导体层夹住窄禁带超薄膜半导体层的单一双

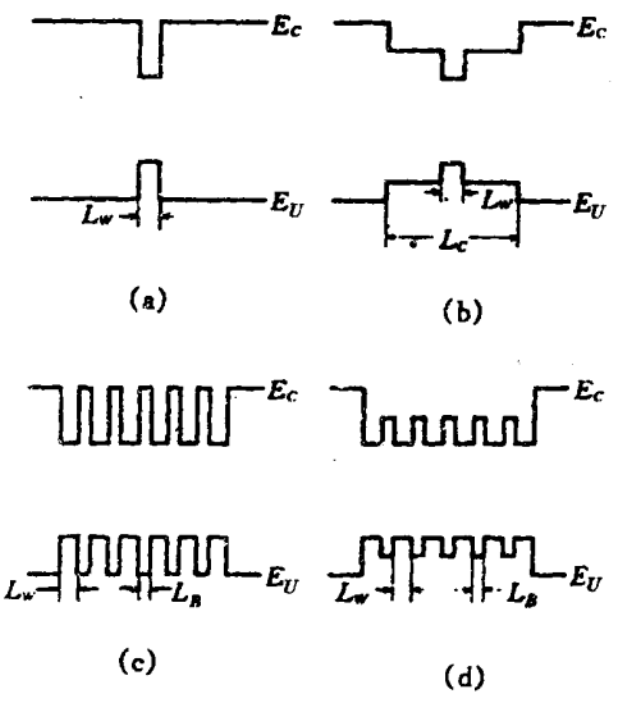


图 2.8-5 量子阱激光器能带图

(a) 单量子阱激光器 (b) 光和载流子分别限制型单量子阱激光器

(c) 多量子阱激光器 (d) 势垒高度较低的多量子阱激光器

异质结量子阱或重复这种单一双异质结的多重量子阱作为发光区的半导体激光器叫做量子阱激光器。由于在量子阱内与膜厚垂直方向的电子和空穴运动被异质结界面势垒所限制，在这个方向的动能被分离而形成子能带，状态密度则变为二维化的阶跃状，因此，在量子阱发光区中的自发辐射光和增益光谱被窄带化，从而降低阈值电流密度，在 GaAs/AlGaAs 系量子阱激光器中已实现了比一般同类激光器小十分之一的 200A/cm^2 左右的低阈值电流密度，另外，增益光谱的窄带化可能导致高速调制时发光光谱宽度的减少。由于失去了膜厚方向晶体完整的平行对称性，在放大

和吸收系数中会出现很强的偏光关系，这种现象对改善激光特性很有用。目前对长波长发光材料 InGaAsP 系也进行了量子阱激光器的研究工作。

4. 电调制发光波长的器件

在具有量子阱结构发光区的发光二极管中逐渐加大偏压时，其发光特性将发生变化。在这种发光二极管中，施加较低偏压时将发出 $h\nu=E_0-E_0'$ 能量的光。其中能量 E_0 相当于量子阱导带底 E_C，而能量 E_0' 则相当于量子阱价带顶 E_V 的量子能级。如果发光时加大偏压，量子阱中的能带倾斜度将增大而发光波长变短。同时 E_0 和 E_0' 上的电子和空穴受电场的影响而改变位置，也就是被赶到相反方向的势垒附近，发光强度将变大。利用这种现象可做出高速光调制器件或超短光脉冲发生器。现已证实，用电场调制 GaAs/AlGaAs 多重量子阱结构的光调制器，可在 130ps 以下的时间常数下工作。

除了上述的几种器件之外，目前还提出了研制各种新功能超晶格器件的设想。比如利用从量子阱子能带到连续能带之间光吸收的红外光探测器；利用量子阱中激子吸收以及与此伴随的强非线性折射率分散的光开关器件；利用电场调制量子阱中电子波函数的速度调制晶体管（VMT）等。看来，今后会不断出现利用超晶格材料制备的高功能新器件。

8.5　应变超晶格

以前研究超晶格材料时，除了 GaAs/AlGaAs 系以外，对其他物质结合而形成超晶格的研究工作进展缓慢。原因是它们之间的晶格常数不同，会引起在薄膜之间的界面中产生缺陷（失配位错），得不到良好的晶体。但是，后来发现，如果多层薄膜的厚度十分薄时，在晶体生长中产生的缺陷反而少，也就是说在弹性形

变限度之内的超薄膜中，晶格本身发生应变而消除了缺陷的产生。目前研究人员巧妙地利用这种现象，开始研究不同晶格常数材料形成的应变超晶格的制备。在应变超晶格中发现了一般超晶格中所没有的新特性。下面将对应变超晶格的设计和研究动向进行简单的介绍。

1. 应变超晶格的设计基础

由于应变超晶格中原成分材料之间的晶格常数不同，在晶体生长时晶格常数将受到应变的影响，因此，应变超晶格的晶格常数和原成分材料的晶格常数不同。在生长超晶格材料时形成与两种原材料界面垂直的和平行的新晶格常数，其中对晶体生长起重要作用的是与界面平行的晶格常数。从理论上知道，可以改变膜的厚度比来控制新的晶格常数。

超晶格材料一般由禁带宽度不同的原成分材料薄膜交替生长而构成。由导带和价带形成新的周期势能来控制电子的行为。对周期势能来说，在应变超晶格中也是和一般超晶格一样，根据原材料膜的薄厚来控制其量子化子能带的形成。当膜的厚度薄时，量子化子能带向高能量方向移动；相反，当膜比较厚时，量子化子能带向低能量方向移动。应变超晶格除了上述的和一般超晶格材料具有共同的性质以外，受应变的影响，不仅是应变超晶格材料的能带结构发生变化，同时原成分材料本身的禁带宽度也发生变化。由此看来，在三元化合物材料的应变超晶格中，比如 InAs/GaAs 系应变超晶格，也像一般的四元系化合物半导体那样，可独立地控制晶格常数和禁带宽度。在这种应变超晶格中，禁带宽度的上限取具有同一晶格常数的三元化合物禁带宽度，下限取以超晶格量子阱层厚度为限的最低量子化子能带。

另外，由于超晶格周期结构中的能带折叠效应，用间接跃迁型能带结构材料做成应变超晶格时，有可能做成直接跃迁型能带

结构的应变超晶格材料。人们特别对 Si/SiGe 系应变超晶格材料进行了这种效应的研究工作，并希望得到直接跃迁型能带结构的应变超晶格材料以及伴随能带结构变化而带来的高迁移率载流子应变超晶格材料。

在一般的超晶格中，由于量子效应，价带中的重空穴和轻空穴能带的简并度被消除。同时由于能带的折叠效应，能带结构和载流子的有效质量将发生变化。另外，在半导体材料中施加应力时，能带结构发生变化而导致有效质量发生变化，尤其是根据应力的方向，价带中的重空穴和轻空穴的能带位置将发生反转。从以上的几种情况来看，在应变超晶格中，根据其周期结构的研究有可能控制载流子的有效质量。实验上已观察到，在应变超晶格的二维空穴气中，对电导有贡献的正是轻空穴，而且它的有效质量也和一般的不同。

2. 各种应变超晶格的研究动向

Si/SiGe 系应变超晶格是典型的 IV 族元素半导体系应变超晶格材料。Si 和 Ge 都是间接跃迁型半导体，但由于能带的折叠效应，所以有可能制备出直接跃迁型的 Si/SiGe 应变超晶格材料。随着能带结构的变化，载流子的有效质量可能变小，从而提高载流子的迁移率。因此，有希望做出比一般 Si 器件更高速工作的电子器件。另外，以 Si 片为衬底材料时，并把超大规模集成电路技术和超晶格的新功能相结合，有可能实现新功能器件的诞生。

在应变超晶格材料中不产生失配位错而能够进行单晶生长时，其单晶薄膜的厚度要求有一定界限，把这种膜厚一般称做极限层厚度。目前正对 Si/SiGe 系应变超晶格的极限层厚度、SiGe 的组分比及其层厚、衬底温度等方面进行理论和实验的研究工作。另外，利用电子显微镜研究界面的突变性和应变缓和的情况等内部结构以及利用拉曼分光测量进行内部应变大小的研究，同时正

积极进行对载流子迁移率及其温度特性等电学性质的研究工作。

现在，我们主要研究 InGaAs/GaAs 系、GaAsP/GaAs 系的Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体的应变超晶格。由于 InAs 和 GaAs 的电子迁移率比 Si 的高，能发挥其长处，所以有可能制备出 InGaAs/GaAs 系应变超晶格材料的超高速电子器件。另外，在一般的三元、四元系化合物半导体材料中，合金散射作用限制了载流子的迁移率，但在单原子层化合物半导体应变超晶格中则可能消除这种影响。因此，目前正研制 InAs 和 GaAs 的单原子层以及数原子层的应变超晶格，以试图减少 InGaAs 单晶中所存在的合金散射影响，达到提高载流子迁移率的目的。

目前，这种 InGaAs/GaAs 系应变超晶格在光电器件方面的应用引起了人们的注意。由于在这种材料中，禁带宽度从 0.36eV 到 1.43eV 连续可改变。可能制出以红外光为对象的发光和受光器件。现已利用 InGaAs/GaAs 系应变超晶格材料研制出了光泵激光器、电注入型激光器、PN 结发光二极管以及 PIN 结型雪崩光电二极管。

GaAsP/GaAs 系应变超晶格不但可以用分子束外延法生长，而且也可以用通常的 CVD 法生长。由于这种应变超晶格的 GaAsP 禁带宽度比较大，其主要用于制作以可见光为对象的发光和受光器件。利用荧光测量已得到 1.8eV 到 2.2eV 的发光光谱，并已做出室温工作的光泵激光器，还研制出了能够检测 2.2eV～3.1eV 高能光的光探测器，对二维电子有关的研究工作也在进行之中。

除了上述的两种Ⅲ-Ⅴ族系应变超晶格以外，还对 InAs/InSb 系、GaSb/AlSb 系、GaAsP/InGaAs 系应变超晶格材料进行了新功能的探索、物理性质的控制以及功能器件研制等方面的研究工作。

Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体应变超晶格中有 GdTe 和 HgCdTe 等窄禁带宽度材料组合而成的应变超晶格和 ZnS、ZnSe、ZnTe 等宽禁带宽度材料组合而成的应变超晶格。

在 CdTe/HgCdTe 应变超晶格中，它的禁带宽度从 0～1.44eV 可连续控制，作为红外和远红外光电器件材料，它引起人们的兴趣。另外，ZnS、ZnSe 和 ZnTe 等半导体的禁带宽度比较大，很早就作为可见光发光器件材料而受到人们的重视。因此，由这些材料形成的应变超晶格也主要应用于可见光发光器件的制备。对 ZnS 和 ZnSe 半导体虽然作为蓝色发光器件材料考虑，但由于自补偿效应只能做出 N 型材料，一般来说用这些材料很难做出 PN 结型的高效力发光器件，然而，利用这些材料的应变超晶格有可能实现 PN 结型发光器件的制作。

比如说，只能得到 P 型的 ZnTe 和只能得到 N 型的 ZnSe 半导体材料组合而形成的 ZnSe/ZnTe 系应变超晶格，只在 ZnSe 单晶中掺入 N 型杂质的 N 型 ZnSe/ZnTe 应变超晶格和只在 ZnTe 单晶中掺入 P 型杂质的 P 型 ZnSe/ZnTe 应变超晶格材料之间形成 PN 结是可能的，因此，人们正在积极进行这种研究工作。比如，已经取得了在 ZnSe/ZnTe 应变超晶格中，根据改变各薄层的厚度比，可控制发光峰值从 1.9eV 的红色到 2.4eV 的蓝绿色的研究结果。

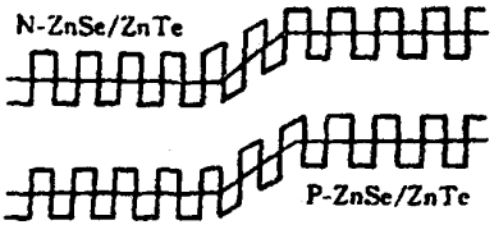


图 2.8-6　N-ZnSe/ZnTe 应变超晶格和 P-ZnSe/ZnTe 应变超晶格形成 PN 结的示意图

除了对 ZnS/ZnTe 系和 ZnSe/ZnTe 系应变超晶格进行研究

之外，人们对 CdTe/CdMnTe 系和 ZnSe/ZnMnSe 系应变超晶格也很感兴趣。因为根据 Mn 的添加，禁带宽度将变大，有希望做出比 HgTe/CdTe 系和 ZnSe/ZnTe 系更短波长的光电器件。

应变超晶格是从能带工程的角度设计的全新的功能材料，然而，从现状来看不能说在物理性质控制方面的理论分析做的很成功。这是由于以下两个方面的原因所致：一是理论分析时引入的参数值还不很清楚；二是必须考虑所谓的应变效应这样的新变量。但是，在实验研究方面已经走出了可喜的一步，比如，已经开始进行在晶格常数不同的材料之间插入缓冲层和新器件等的研究工作。

在应变超晶格材料中具有其他半导体材料和普通超晶格材料中所没有的新功能。将来不仅要对半导体之间的应变超晶格材料进行研究，也可能对金属/半导体系、有机物质/半导体系等新的应变超晶格材料进行研究，并开发出很多种新的应变超晶格功能材料。

8.6 非晶态超晶格

由于非晶态半导体不是长程有序的，电子的波函数几乎不扩展，因此，能不能利用非晶态半导体做成非晶态超晶格呢？原来认为在非晶态超晶格中不可能出现超晶格中特有的量子效应，然而，除了局部能级上的电子和空穴以外，在能带中对电导有贡献的电子和空穴来说，虽然是非晶态半导体，但其波函数应该是相当扩展的。根据这个推论，Tiedje、广濑等提出非晶态超晶格并在实验上做出了非晶态半导体的多层膜，观察到超晶格特有的量子效应，后来，很多人开始对非晶态超晶格进行了研究。

在非晶态半导体中应用超晶格结构的理由是除了物理性质的基础研究以外，主要是为了提高载流子寿命等参数，反过来，在

超晶格结构中应用非晶态的理由是为了改善其结构的柔软性，也就是说，在两种晶体界面中存在晶格不匹配的问题而在超晶格原材料的组合上受到很大的限制。在前面已专门叙述过在超晶格界面中的应力被缓和的应变超晶格设计基础，根据这个设计，在应变超晶格中，原材料组合的限制已有所解决，但它总是个问题，在非晶态情况下，由于结构的自由度很大，晶格不匹配问题可能有所缓和。另外，由于容易改变非晶态材料本身的物理性质，使在器件设计上的自由度更大，而且这种非晶态超晶格材料有可能在较低温度下生长以及容易形成大面积化等的特点而将成为很有希望的新功能材料。

和晶态超晶格一样，在非晶态超晶格的光学特性中重要的一点是光学禁带宽度的变化。在前面已经说过，由于在量子阱内形成子能带，量子阱层的有效禁带宽度将扩大。从 a-Si/a-SiN 超晶格结构量子阱层宽度与禁带宽度关系的实验结果来看，随着量子阱宽度 L 的减少，禁带宽度变大，而且出现量子效应。另外，从 a-Si/a-SiN 超晶格结构膜的电子漂移迁移率的温度特性实验结果看，根据适当的结构膜设计可得到比单层非晶态膜更好一些的迁移率特性。

非晶态超晶格材料在器件方面已得到应用，下面介绍用非晶态超晶格材料做 P 型窗口层的太阳能电池。为了改善 a-Si 太阳能电池的特性，常采用宽禁带宽度窗口材料，增加主要发光区层的光吸收量的方法。一般非晶态硅太阳能电池的窗口材料是 a-Si，但随着禁带宽度的增大，它的电导率大幅度降低，从而带来很大的电能损失。为了改善这个问题，现在利用光 CVD 法已做出了禁带宽度大而导电性良好的非晶态超晶格材料。因此，在这种太阳能电池的窗口层使用了用光 CVD 法制备的 a-Si：H 模和 a-Si：H 膜多层结构的 P 型非晶态超晶格材料，本征层 I 和 N 型层是用辉

光放电法制备的非晶态材料。这种太阳能电池已达到的开路电压为 $U_{oc}=0.752V$，短路电流为 $I_{sc}=17.9mA/cm^2$，形状因子为 $F=0.623$，转换效率为 $\eta=8.39\%$。

这种结构的太阳能电池与普通的非晶态太阳能电池比较，短路电流 I_{sc}大。另外，在利用 P 型超晶格材料形成太阳能电池的窗口层时，在 300nm～500nm 短波长范围的收集效率将得到大幅度改善。比如，对波长 460nm，其收集效率从 50%提高到 70%。从这些分析结果看出，提高短波长光收集效率是在具有非晶态超晶格结构窗口层太阳能电池中改善 I_{sc}的主要手段。

现在一般的非晶态硅太阳能电池的最高转换效率为 $\eta=11.5\%$，对非晶态超晶格太阳能电池来说还未超过它，但根据超晶格生长技术的进一步发展以及掺杂量的改善，预计它的转换效率将进一步提高。

8.7 超晶格结构的发展趋势

在异种半导体材料相接的异质界面中，如果能做成平坦而突变的结时，由于材料组成不同，对于电子形成高度为数百 meV 的台阶形势垒。因此，如果设置数个这种势垒，选择各种各样的位置时，在半导体中可以做成多种形式的势能分布。比如，用超薄膜做成势阱，其宽度 L_W 选为与得布洛意波长差不多时（≤10nm），在超薄膜中形成电子的驻波状态，其波长 λ 将量子化为 $(2L_W/n)$，这就是量子尺寸效应。其中 n 为量子数（$n=1$、2、3…）。另外，如果设置与电子波渗透长度差不多厚度的超薄膜势垒时，它起电子的隧道势垒作用。这些量子阱和遂道势垒则显著表现出电子波动性质的最基本的物理结构。

然而，在现实的半导体结构中最初引起量子尺寸效应的超薄膜电子系统并不是由所谓的异质结构，而是 MOSFET 的 N 型反

型层构成的。

1955 年 Schrieffer 从理论上研究了在 P 型半导体表面加栅偏压而形成的 N 型反型层，并得出了如下的结论：(1) 由于层厚度约为 10nm，有产生量子尺寸效应的可能性；(2) 由于表面散射等原因，电子的能级将扩展，失去分立性，直接观察量子尺寸效应很困难。但是到了 20 世纪 60 年代后半期，利用刚开发的 SiMOS-FET，在 4.2K 温度下研究振动磁阻时，首先由 Fowler 等明确了量子尺寸效应的产生，后来，在室温下也观察到了这种效应。

另外，关于半导体结构中的隧道效应，以前虽然指出了几种根据，但由于当时制备良好的隧道势垒有困难，没有得到明确的证据。到了 1958 年，在受主和施主浓度很高的锗 PN 结中，由于耗尽层非常薄，在其电流电压特性中，首先由江崎发现了由隧道效应而引起的负阻现象，它成为隧道效应的有力证据。对于 SiMOS 及隧道二极管的研究工作，作为量子力学基本概念的证据，具有非常重要的意义。然而，为了实现量子效应需要制作突变势能的器件，都是借助于半导体内部空间电荷的电场实现的，因此，所得势能的自由度受到很大的限制。

但是，到了 20 世纪 70 年代，半导体激光器等以 GaAs 为中心的化合物半导体器件的发展非常迅速，晶体生长技术也迅速发展，上述的限制大幅度降低了。也就是说，分子束外延法 (MBE)，金属有机化合物的气相外延生长法 (MOVPE) 等新外延技术的出现，可以做出具有原子层级厚度的半导体超薄膜和其叠层异质结构。因此，不仅可以做出量子阱或隧道势垒，还可以按设计要求做出多种多样的电子势能分布 U。1970 年江崎和朱兆祥提出的多个量子阱周期地并列，相间势垒形成隧道势垒的半导体超晶格，并从中观察到了负阻效应，这些表现出量子效应的异质结构可统称为量子微观异质结构 (QMHS)。

在量子微观异质结构中，由于电子的波动性，表现出了各种新的性质，大体上分为：

（1）因量子尺寸效应，电子和空穴被限制在量子阱中，形成二维电子状态而产生的各种性质。

（2）被限制的电子和施主，或者空穴在空间中分离而产生的各种效应。

（3）由电子的隧道效应和干涉效应引起的各种非线性性质。

（4）由于有效地生成（或消灭）热电子流，虽然是半经典的，但可以实现各种各样的新功能器件。

在量子微观异质结构中，人们很关心的是超高速晶体管。从1976年开始研究二维电子电导现象，到1978年Dingle和Störmer指出在调制掺杂结构的超晶格中电子迁移率很高的现象及1979年在GaAs/N-AlGaAs单异质结界面中观察到具有高迁移率二维电子气的形成，从此，它作为FET材料受到人们的重视。1980年日本的三村和冷水等首次成功地试制了GaAs/N-AlGaAs单异质结场效应晶体管，这种器件被命名为高电子迁移率晶体管，简称为HEMT。1981年利用HEMT制作了环形振荡器电路。它的超高速工作的开关时间达到13ps。

在逐步深入理解HEMT结构的同时，也发现了它所受的限制，为了排除这些限制，提高和改善器件的特性，人们提出了几种新异质结构的晶体管。这些器件都是不含有施主杂质的非掺杂GaAs层作为沟道的异质结构，因此，一般称为HEMT族，或高纯度异质结构FET族器件。下面在介绍这种器件的同时也分析其不足。

已经知道，为了提高GaAs/N-AlGaAs异质结中的电子迁移率，在异质界面中形成不含有施主杂质的AlGaAs层，这个层叫做阻挡层。当这个层的厚度W_{sp}增加时，电子迁移率μ虽然增加，但

是二维电子浓度 N_s 将减少。在具有不同阻挡层厚度 W_{sp} 的 HEMT 中，电子浓度 N_s 作为栅偏压的函数测定的结果表明，当增加 W_{sp} 时，N_s 的最大值 N_{smax} 明显减少，这是因为形成势垒的 AlGaAs 导带（以及与此相随的施主能级）靠近 AlGaAs 中的费米能级（或者交叉）而产生的结果。当 HEMT 作为场效应晶体管（FET）工作时，由于沿异质结界面加强电场，电子则以接近其饱和速度 v_s（10^7cm/s）的速度运动，通过沟道的电流密度最大值就由 ev_sN_{smax} 决定，此时，晶体管的响应时间原则上可缩短到通过沟道的时间（二沟道长/v_s）。但是，供给的电流量小，而且当需要长时间充电时，响应时间就变得很长。因此，设计高速 HEMT 时，设定 W_{sp} 为零，这样虽然多少牺牲些迁移率，但能提高 N_{smax} 到 1×10^{12}cm^{-2} 左右。

那么有没有既能保持高电子迁移率，又提高电子浓度 N_{smax} 的好方法呢？利用调制掺杂的双异质结构（SDDH）[也可以称为单一量子阱（SD-SQW）]，就可以实现比单异质结构 HEMT 多二倍电子浓度（$1.3\sim2\times10^{12}$cm^{-2}）和高电子迁移率（$\mu>10^5$cm/V·s）异质结构晶体管。后来进一步利用这种结构试制了晶体管 SD—DHFET，得到了很高的电流驱动能力。这种新器件结构是利用 MBE 法在 AlGaAs 上生长高质量的 GaAs 层而形成的。

在标准 HEMT 结构中存在的第二个问题是，施加在栅极上的最大电压值 U_{max} 比较低（+1V 左右），因而逻辑电路的自由度比较窄。这是因为在 HEMT 中采用金属-半导体 N-AlGaAs 肖特基作为栅极的缘故。因此，如果采用 SiMOSFET 那种具有高势垒的栅极结构，就有可能原则上使这个问题得到解决。从这个观点出发，又提出了具有绝缘栅的异质结 FET（MISS-FET）结构，在这种结构中虽然多少存在着界面态效应，但明显扩大了栅偏压的范围。

另外，在调制掺杂异质结构中，由于掺 Si 于 AlGaAs 层中形成深能级而存在以下两个问题：

(1) HEMT 的阈值电压，或者沟道中感应出的二维电子数 N_s 与温度有很强的关系。

(2) 在低温下光照时，N_s 发生变化，并继续维持这种状态(残留光电导)。

上述效应对 HEMT 等调制掺杂异质结构器件的稳定性有害，是应该解决的课题之一。马场等用 GaAs/AlAs 超晶格结构代替 AlGaAs，只在 GaAs 中掺 Si 时发现可以避免上述深能级的产生。因此，利用这种方法作为解决上述问题的方法之一引起了人们的注意，这就是广泛应用的所谓“超晶格合金”技术。

在逻辑电路或存储器等中使用 HEMT 等超高速器件时，需要联结很多晶体管，这些晶体管的特性应该相同，根据阿部等的计算，在大规模电路中 AlGaAs 膜厚度、施主 Si 浓度、肖特基势垒高度等的不均匀因素总和应控制在 5%以下，这样高的均匀性，对标准的 HEMT 结构来说是不容易做到的。为了解决这个问题，提出利用 N^+-GaAs/AlGaAs 二层结构代替 HEMT 栅极的金属/N-AlGaAs/AlGaAs 三层结构的方法。在这种结构中表现出晶体管栅阈值的电压均匀性非常好。

除此之外，木下等研究了 HEMT 结构上下反转的逆 HEMT 结构的晶体管。看来，具有异质结构的场效应晶体管今后将向多样化发展。但是如上所述，这些晶体管的共同特点是在结构上都具有高纯度的 GaAs 沟道层，而在特性上则共同利用高电子迁移率特性。在这个意义上可以把各种各样的 HEMT 器件统称为 HEMT 族或者高纯度异质结构 FET 族。

1975 年范德吉尔 (Van der Ziel) 等首先利用光泵法在 GaAs/AlGaAs 量子阱结构中观察到受激辐射并发现：

（1）发光波长几乎对应于量子阱内电子和重空穴基态能级间的跃迁能。

（2）和一般激光器相同，在量子阱激光器中也可以利用电注入方式得到激光振荡。

（3）振荡波长几乎对应于基态能级间的有效禁带宽度 E_g^*，但是，详细分析结果表明光子能量比 E_g^* 低 15～30meV。

（4）从实验和理论上都确认了量子阱激光器的阈值电流密度比一般激光器的低二分之一以下。

量子阱激光器中阈值电流密度已降低到 200A/cm^2 以下，得到可以在 10mA 以下的电流下起振的激光器，在这样微小电流下工作的激光器有如下几个特点：

（1）小电源下可进行工作。

（2）热损耗小，可以做到长寿命和高功率。

（3）在同一晶片上并列驱动多个激光器。

上述的几个特点在激光器的实用上具有非常大的意义。已有 40 个量子阱激光器制作在同一晶片上，从整体上得到了在室温下 2.5W 输出功率的激光器组合器件。由于这 40 个激光器是光学上相结合在一起的，因此，确认了它们的同相位的工作状态，具有代替 Kr 激光器等气体激光器的可能性。半导体激光器在光通信、声盘、光盘、激光印刷等领域中有着多种用途，这些应用都要求激光器高性能化。如果认真踏实地去研究量子微观异质结构，这些高性能激光器的社会需求，完全可能是由量子阱激光器来满足的。

利用量子阱的光电器件，除了激光器之外，还有各种各样的研究。其中之一就是利用外电场控制在量子阱中处于激发状态的电子和空穴复合发光过程的方案。在激发状态的量子阱中，一般可得到很强的发光强度。如果在这种量子阱中与界面垂直方向施

加电场时，由于电子和空穴在空间中被分离，其发光过程被抑制而光输出功率急剧下降，这种现象首先由曼德（Mender）等发现。这个研究的目的是由控制载流子的波函数来控制载流子的动态过程，这种器件可以说是波函数工程器件的代表，此现象可在发光二极管的高速调制方面应用。根据山西等的计算，它可在载流子寿命为 10ps 以下的超短光脉冲发生器上应用。同时载流子的极化对光吸收率也有影响，因此，还可以在调制器或光开关器件中应用。

第二个例子是，利用光折射率的非线性特性，在室温下实现了全光学式双稳定开关状态。这个效应被解释为，由于量子阱势能的存在，激子束缚能增大，室温下加强了光学的非线性而引起的效应。后来的研究表明，在 GaAs 体晶体中也观察到了室温下同样的光双稳定性，对此现象的机理的解释还有待今后进一步研究。

N 型 GaAs 超薄膜和 P 型 GaAs 超薄膜叠层化的超晶格结构叫做 NIPI 超晶格或者掺杂超晶格，在这种超晶格中有如下几个特点：

（1）电子和空穴在实空间中分离。

（2）由于电子和空穴空间分离，其中有效禁带宽度 E_g^* 比 GaAs 的 E_g（=1.43eV）小。因此，对一般 GaAs 透明的长波长光（$\lambda>0.9\mu m$）也可能进行带间跃迁，可用于在这个光谱的光检测或者发光器件上。

（3）由于这种禁带宽度的减少效应还受外电场的影响，所以它也可作为光调制器使用。

这些特异的物理性质，在麦克斯、普朗克研究小组的努力下逐渐得到证实，但是，这种特异材料作为器件应用时，其真正的评价还未确立，只好等待今后的努力和创造性的发展。

InAs/GaSb 超晶格也和 NIPI 超晶格一样，具有电子和空穴

在实空间分离的功能，亦表现出各种各样的新特性。特别是，在InSb和GaSb界面中，有禁带宽度以上大的能带不连续性，当两者的膜厚都在15nm以上时，InAs导带中的电子基态能级E_0位于GaSb价带中空穴的基态能级E_0'的下方。因此，出现电子和空穴并存的状态，即半金属状态，另外，当两者的膜厚变薄时，或者在两者中混入GaAs而形成（$In_{1-x}Ga_xAs/GaAs_xSb_{1-x}$）异质结构时，将出现$E_0>E_0'$关系。所以从系统整体来说表现出有禁带存在的状态，即表现出半导体的行为。为了利用这种特异性质，已提出几种器件的设想并进行了分析。

从这种异质结构在雪崩倍增型光检测器（APD）方面的应用来看，假如电子和空穴沿异质界面方向加速，这时如果空穴存在的膜层选禁带宽度很大的半导体材料时，空穴的碰撞电离被抑制，只促进电子的碰撞电离，也就是说，电子电离系数α比空穴的电离系数β大很多，因此，如果能够选择性地进行电子或者空穴一方的碰撞电离，APD的低噪声化和高速化是很有效的。此外，还提出了实现P-GaSbAs/N-InGaAs/P-GaSbAs结构高速晶体管的设计方案，这种设计的目的是，利用施加在N-InGaAs基层中电压的大小，控制空穴的隧道势垒高度来获得高速晶体管的作用。

一般说来，晶格常数不同的半导体材料叠层化时，在其界面处因晶格失配而产生失配位错等晶体缺陷。然而，当各层厚度十分薄时，各层将发生伸缩现象而晶格失配度减少，可能不产生失配位错，这样就可以做出无失配位错的超晶格材料。这种超晶格叫做应变超晶格（SLS）。已经做出了$GaAs/GaAs_{0.5}P_{0.5}$、$GaAs_{0.4}P_{0.6}/GaP$、$In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$等的应变超晶格材料，并对它们的性质进行了分析。比如，在$N\text{-}GaAs/In_{0.2}Ga_{0.8}As$调制掺杂结构的应变超晶格中，已经观察到很高的电子迁移率。另外，利用$GaAs/In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$的双异质结构的应变超晶格可以实现

半导体激光器。在$GaAs/In_{0.2}Ga_{0.8}As$应变超晶格中掺入施主和受主的结构具有PIN光检测器功能，在GaAs/GaP应变超晶格中也观察到了光泵激光振荡现象。研究工作表明，应变超晶格不仅具有一般超晶格所具有的特性，而且由于应变引起能带结构发生变化，这就给器件带来了一些新的特性。目前GaInAs/GaAs、GaInAs/InP、GaInAsP/InP等的大功率、低阈值、长波长应变量子阱激光器的研制已获得了很大的进展，成为研究激光器的前沿课题之一。

另外，在应变超晶格中，由于压电效应，导带和价带的能带结构可能表现出复杂的行为。比如说，在（100）面上形成$GaAs_{0.4}P_{0.6}/GaP$超晶格时，由于超晶格势能和压电效应的共同存在，在能带结构中将出现直接跃迁的倾向。今后会进一步研究应变超晶格固有的物理性质和功能。

下面考虑制备半导体细线。这种半导体细线的断面积尺寸L_y和L_z与电子的得布罗意波长λ相差不多。在这种半导体细线中由于量子力学上的限制，电子的运动不仅在Z方向量子化，在Y方向也量子化，这时电子只在X方向运动。因此，电子成为所谓的一维电子气（1DEG）。这种极微细的半导体细线被称为量子阱细线（QWW）或称量子线。

这种细线是利用特殊的刻蚀技术实现的。但考虑到微细加工时所产生的晶体缺陷影响，制备这种量子细线并不那么容易。作为量子细线的应用，除了上述的超高电子迁移率效应之外，还有几个方面。例如，1982年荒川等提出并分析了利用量子线（以及量子箱）作为有源层的量子阱激光器，在这种多维量子阱激光器中，由于电子和空穴的合并状态密度，在$E=E_g$时，具有非常高的值，抑制住了载流子能量的分散，其结果，激光振荡所需阈值电流对温度的稳定性依赖变得非常大（在量子阱细线中$T_0=$

430℃，量子箱中则 $T_0=\infty$)。

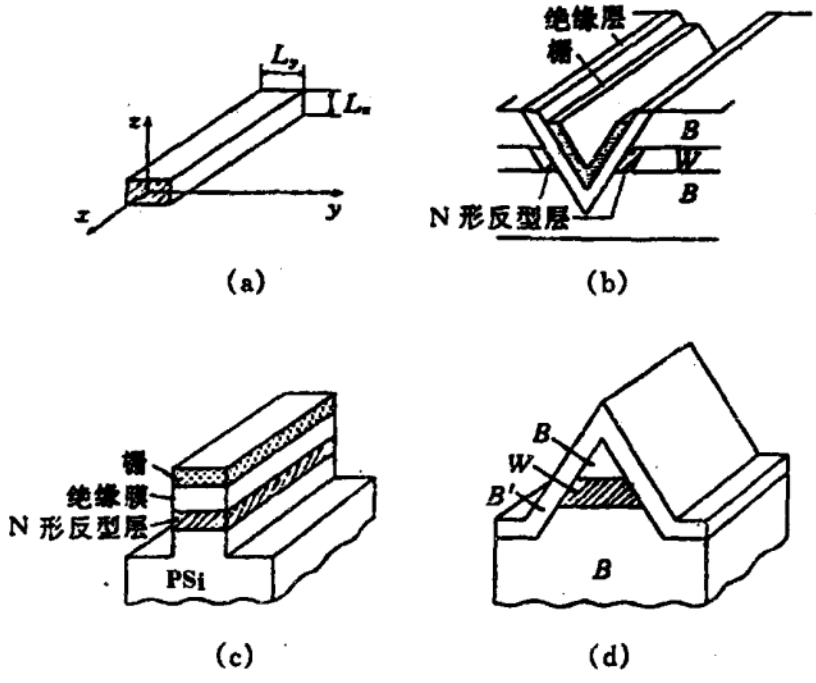


图 2.8-7　各种量子细线（QWW）

对 Ge 和 Si 为代表的元素半导体的研究带来了晶体管和 LSI 的实现，以 GaAs 为代表的化合物半导体及其固溶体的研究带来了半导体激光器和高速 FET 等的实现。这些器件与计算机或者光通信系统联结在一起，对人类的文化来讲具有非常大的影响和贡献。在本节中介绍的量子微观异质结构，可以说是超薄膜制备技术和量子物理材料设计理论相结合而出现的第三种类型的半导体材料。如果巧妙地利用这些材料，可以显著提高 FET 和激光器等半导体器件的性能，也可以出现电子-电子相互作用而引起的像分数量子霍耳效应等在固体物理学上完全新的物理现象，可以预料，今后由于创造性的努力，将会出现至今还未有的功能更优异的电子器件。

第九章 超导体

通常的金属和合金的电阻率是随温度的降低而下降的，但是，一般在极低温度下也并非表示出零的电阻值。然而 1911 年温奈士（Onnes）首先发现，把 Hg 冷却到 4.2K 时，电阻急剧减少而达到零值。在某种温度下电阻值变为零的材料叫做超导体。这种超导现象已在 25 种金属和数百种合金和化合物中观察到了。在多数情况下，在某特定温度下电阻变为零，并从常导体变为超导体的这种温度被称为转变温度 T_c。

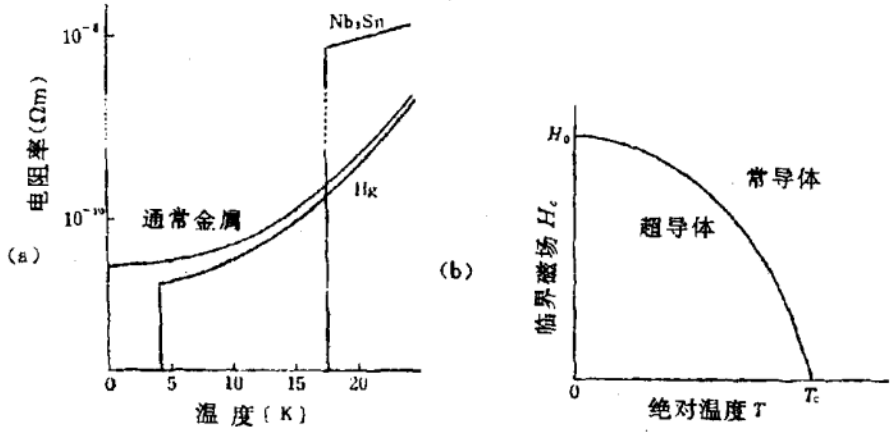


图 2.9-1 通常金属和超导体的低温电阻率温度特性及临界磁场的温度关系

在超导状态的物质中施加磁场时，超导状态被破坏而回复到常导状态。破坏超导状态所需的磁场叫做临界磁场 H_c。这个临界磁场多数情况下是与温度有关系的。下面例举金属超导体的转变温度和绝对零度时的临界磁场 H_0。

金 属	T_c (K)	H_0 ($10^2 Am^{-1}$)	金 属	T_c (K)	H_0 ($10^2 Am^{-1}$)
Al	1.196	7.9	Pb	7.175	64
Cd	0.56	2.4	Re	1.699	16
Ga	1.091	4.1	Ru	0.49	5.3
Hf	0.165	—	Sn	3.74	24.5
Hg (α)	4.153	33	Ta	4.483	62
Hg (β)	3.949	27	Tc	11.2	—
In	3.407	23.5	Th	1.37	12.9
Ir	0.14	1.5	Ti	0.39	≈8.0
La (α)	≈5.0	—	Tl	2.39	13.6
La (β)	5.95	127	U (α)	0.6～0.7	≈160
Mo	0.92	7.8	V	5.3	≈100
Nb	9.25	159	Zn	0.91	4.2
Os	0.655	5.2～6.5	Zr	0.55	≈37

室温下良导体的碱金属和 Cu、Ag、Au 等不显出超导性质。相反，室温下并非良导体的元素反而表现出超导性质，另外，Fe、Co、Ni 等的强磁性金属也不表现出超导性质，这些都引起了人们的关注。在 Pb 圆环中感应产生的数百 A 电流作为永存电流，经过几年也不衰减的实验事实，证明了超导状态中电阻值确实为零的状态。另外，通过回转磁效应确认了超导电流为电子电流。

在超导状态中电阻率为零而欧姆定律不成立，在超导体内部的电场 E 始终是零。根据电磁理论，从电阻率 $\rho=0$ 导出的结果是磁通密度 B 的时间变化 dB/dt 为零，而 B 不等于零。但是 1933 年美士纳 (Meissner) 等从实验中确认了在超导体内部中始终为 $B=0$ 的事实。因此，这种现象称为美士纳 (Meissner) 效应。如果 $B=0$ 时，相对导磁率 μ_r 也等于零，这表示超导体为完全反磁性体。

也就是说，在超导体上施加磁场时，为了抵消外磁场而在超导体内表面产生电流而防止磁通量的浸入，以便在超导体内始终保持 $B=0$ 的条件。

超导体的电流密度 J_s 几乎集中在表面的薄层内，从理论计算和实验结果中都可以得到大约为 200 的渗透度，这个渗透度表示超导体表面电流密度减少到 1/e 的深度，或者表面磁通密度减少到 1/e 的深度。

1950 年发现的同位素效应是有关超导体的非常重要的实验结果，即某种元素，比如说 Pb 的各种同位素的转变温度 T_c 与其同位素质量 M 之间有 $T_c\sqrt{M}=\text{Const}$ 的关系。由于质量的变化并不引起电子结构的变化，因此，上述关系暗示超导现象是根据电子和原子（晶格振动）的相互作用而产生的。由于晶格振动频率与 $\sqrt{M}$ 成反比，因此，转变温度 T_c 与德拜（Debye）频率 ν_m 成比例，从而与德拜温度 Θ_D 成比例。

超导体的电子比热对人们理解超导现象给出了重要的线索。比如，ν 的极低温比热在转变温度下表现出异常性，而且这种异常性表示二次相转变。超导状态的比热随温度按指数函数变化，这表示在超导电子能级中存在基态和最低激发态之间的能量间隙。通过很多实验已确认这种能隙的存在，其值在 0K 温度时约为 $3.5kT_c$，并随温度的升高而减少，到转变温度 T_c 时为零。

最直接表现出能量间隙存在的实验是隧道效应的实验。在 Al 表面形成 100 左右的 Al_2O_3 薄膜，然后在上面蒸发 Pb 的 $Al/Al_2O_3/Pb$ 结中，在 1K 温度下，施加 Pb 膜为正的偏压时，得到隧道效应电流的伏安特性。曲线的极大和极小之间的电压差对应于 Al 的超导能量间隙。其能量为 1.6×10^{-3}eV。另外，电流极大时的电压 11.8×10^{-3}V 则对应于 Pb 的能量间隙和 Al 能量间隙差的一半。因此，在 1K 温度下 Pb 的能量间隙约等于 25×10^{-3}

eV。从隧道电流曲线容易导出能量状态密度函数。

在常导体中电子和声子的相互作用是形成电阻的重要原因。弗洛里兹（Fr　hlich）首先提出在超导体中电子和声子的相互作用也起重要作用的预言。超导状态和常导状态的能量差为 kT_c 左右，比晶格振动特征德拜温度 Θ_D 对应的能量小很多，因此，对超导体有贡献的只是在费米能级附近 kT_c 左右范围内的电子。

1957 年，巴丁、古柏（Cooper）和施莱佛（Schriefer）进一步发展了弗洛里兹（Fr　hlich）的想法，并提出超导电子论，即 BCS（Bardeen、Cooper、Schriefer）理论。因此理论，在 1972 年他们三人共同获得了诺贝尔奖。这个理论中指出，动量绝对值相等且符号相反，自旋反平行的两个电子对，通过声子的媒介，即与声子的相互作用而形成强结合的一种束缚状态，并降低相当于它们结合能的能量而具有超导状态。这样在费米能级附近的状态密度中产生能量间隙，从理论上可以导出这种能量间隙的大小、温度特性以及电子对波及的相关距离。这种距离称为干涉长度，对单纯超导体中它约等于 10^{-6}m。

干涉长度与电子的自由程有关，所以，根据不同物质而不同。干涉长度比渗透深度大的超导体叫做第Ⅰ类型超导体或软超导体，干涉长度比渗透深度小的则叫做第Ⅱ类型超导体或硬超导体。上面叙述的超导体特性主要是以第Ⅰ类型，即单纯超导体为对象进行说明的，但第Ⅱ类型超导体与第Ⅰ类型比较表现出非常不同的特性。多数的元素超导体是属于第Ⅰ类型的，并在绝对零度温度下具有 10^4Am^{-1}左右的临界磁场。然而，多数化合物和合金超导体是属于第Ⅱ类型的，而且具有 10^6Am^{-1}左右的临界磁场。后者的种类非常多，下面列举几种化合物及合金超导体的组分及转变温度。

材 料	T_c(K)	材 料	T_c(K)	材 料	T_c(K)
$AlNb_3$	18	GaV_3	16.8	NbSn	17.91
$AuNb_3$	11.5	$InLa_3$	10.4	$Nb_{0.8}Sn_{0.2}$	18.18
$C_{0.5}Mo_xNb_y$	10.8～12.5	MoN	12～12.5	Nb_xSn_y	18.2_{max}
$C_{0.5}Mo_xTi_y$	10.2	Mo_3Re	10.0	$Nb_{3x}SnTa_{3(1-x)}$	6.0～18.0
CN_xNb_y	17.8_{max}	MoRu	9.5～10.5	Nb_2Zr	10.8
CNb	10.3	N_xNb_y	3.8～15.6	SiV_3	16.8～17.8
CTa_xW_y	10.5_{max}	$N_xNb_yO_2$	6.0～11.0	$Si_{0.9}V_3C_{0.1}$	16.4
$GaNb_3$	14.5	Nb_3Sn	18.07	$Si_{0.9}V_3B_{0.1}$	15.8

在第Ⅱ类型超导体中有转变温度高的超导体。它们具有不完全的美士纳（Meissner）效应，即 $B\neq0$、通过相当于 H_c 的电流时也不破坏超导状态、超导和常导状态的转变范围很广等特点。只根据组分来区分第Ⅰ类型和第Ⅱ类型的超导体是很困难的，元素超导体中也有硬元素超导体是属于第Ⅱ类型的。在属于第Ⅰ类型的元素超导体中，若施加极端的机械应力时，也可能表现出第Ⅱ类型超导体的性质，即表现出很高的临界磁场，比如说，在纯 Sn 中施加应力而打乱晶体的规则性时，T_c 从 3.74K 提高到 9K，而 2K 时的 H_c 值则从 $2.1\times10^4 Am^{-1}$变到 $1.5\times10^6 Am^{-1}$。

在理想的第Ⅰ类型超导体中，施加 H_c 的磁场时，磁通量突然渗透到超导体内而变成常导体。但是，在理想的第Ⅱ类型超导体中则直到很高的磁场也不失去超导状态。这种现象与材料冶金学的组织或晶格缺陷及几何学结构有很大关系，因此，在实际超导体中产生的现象是更加复杂的。在属于第Ⅰ类型的超导体中，当磁场接近 H_c 时，一部分磁通量渗透而形成超导区和常导区混合的复杂物体，结果转变成常导状态。

在第Ⅱ类型超导体中，由于干涉长度短，当磁场达到一定值

时，其内部分成非常微细的常导区和超导区。理论以及实验上的分辨极限是由具有 $hc/e=4\times10^{-15}$Wb 大小的磁通量子 fiuxon 决定的，这里 h 是普朗克常数，c 是光速，e 是电子电荷。这个 fluxon 量子被缺陷俘获而与强磁性体一样，在 B 和 H 之间出现磁滞现象。由于第 I 类型超导体具有这种内部结构，在强磁场的磁通量几乎渗透的状态下也残留着超导纤维从而对磁场破坏超导状态的抵抗力很强。

由于在超导体中无欧姆损失而可以流过大电流，在应用方面可以考虑各种有趣的例子。比如，在 4.2K 温度下，Nb_3Sn 超导体中可以通过 $10^9A\cdot m^{-2}$的电流，因此，如果超导线的冷却在经济上可能的话，可作为电力输送线应用。这时电压为 10^5V 时，利用 $1cm^2$ 截面积的这种超导线可以输送 10^7kW 的电力。

超导磁铁是利用超导线做成圆筒形线圈，并通过电流而产生强磁场的装置。但是，根据自生的强磁场，超导性被破坏，因此，虽然使用临界磁场高的第 I 类型超导线，但所通过的电流密度也不能高。然而，利用比较小型的圆筒形线圈可以产生 $4\sim10\times10^6Am^{-1}$的磁场，人们正在逐渐使用这种超导磁铁。另外，超导磁铁是作为电磁流体力学（MHD）发电用高磁场的产生手段而受到人们的注目的。

利用第 I 类型超导体在较低磁场中转变成常导体性质的器件有低温管（Cryotron），在这个器件中铁芯和线圈都用超导材料制成，两者都处于转变温度以下而保持超导状态。在线圈中通过所需电流时，铁芯则从超导状态转变为常导状态并控制其电流，当作为工作温度选择液氦沸点为 4.2K 时，合适的铁芯是 Ta 材料，但线圈材料应始终保持超导状态。因此，最好使用 T_c 高的 Nb 或 Pb 材料。为了提高开关速度，最好是超小型的器件，实际上采用的是两种超导体做成的薄膜并通过绝缘体把其重叠起来使用的方

法。

如果在第Ⅰ类型超导板或者超导膜中存在孔洞时，在其表面垂直方向上施加外磁场而变成常导状态之后，去掉磁场而重新成为超导状态的话，超导体内通过的磁通量则被挤向超导体外，并在孔洞中被俘获。只要超导状态不再被破坏，被俘获的磁通量就会永远存在下去。由于该磁通量的方向与外磁场的磁通量方向一致，这种被俘获磁通量的现象，可作为双稳态逻辑电路器件或存储器件使用。

根据前面叙述的 BCS 理论，在超导体中的电子成对进行运动，而且所有的电子对都步调一致地进行运动，这样，它们与常导体或半导体中随意运动的电子相比具有本质上不同的性质。利用这种新特性而开发出的器件中有约瑟夫逊（Josephson）效应器件，这种器件具有电流和电压的强非线性、对磁通量的高灵敏度性和高响应性的三大特点，因此，约瑟夫逊效应器件具有以前器件所没有的新应用。比如，对电压标准的应用来说，过去的国家标准是采用复数个化学电池的平均电压来维持的，得到 1 个电池的电压长期稳定度为 10^{-6}/年是困难的，而且很难知道复数个电池的平均值变化。与此对比，使用约瑟夫逊效应的电压标准是用频率读出电压的，因此，只要做好频率标准，原则上随时都可以得到标准电压，其精确度可达到 10^{-8}。另外，还可生产磁通量灵敏度为 $10^{-19}\mathrm{Wb}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$的最高灵敏度磁通量计，作为下一代计算机使可能的开关时间为数十 ps、耗电为数 μW 的超导体器件等。

超导体的主要研究方向是制备出高温超导材料。前面所列举的元素超导体、化合物和合金超导体的转变温度都很低，这就给应用带来经济上和使用上的很大不便和不经济。目前已制备出 T_c 为 77K 温度以上的化合物和合金超导体，这些高温超导体的具体材料成分和制备方法等暂时是不宜公开的，即使是公开的也不一

定是详细的资料。在日本中学或高校中已开设超导体的实验课。1987 年笔者在日本关西学院大学进修时，曾亲眼看见过本科生普通物理实验室中开出的超导体实验情况。学生自己配制超导材料，并在液氮温度 77K 下进行超导体特性测试。据说日本已研究出室温超导薄膜材料并继续研究线状超导材料。如果真能实现室温超导材料并赋诸实施的话，那将给电子工业带来革命性的变化。

第十章　进入超晶格时代

在 1839 年法拉第的文章中记载了具有奇特性质物质的存在。这篇文章被认为是对半导体的最初文献，即如前所述的有关 Ag_2S 电导率温度特性的文章。也就是说，对金属加热时电阻变大，但对 Ag_2S 则相反，电阻变小，后来搞清了这种性质就是半导体的普遍性质。随后在 19 世纪后半叶，很多人对半导体的光电导现象、整流作用以及光电动势效应等进行了研究。当时使用的材料是 Se、Cu_2O、PbS、FeS_2 或 Cu_2S 等半导体。在 19 世纪中有关电气现象的物理及应用方面有了很大的进步，但对物质性质的研究方面则进步不大，对半导体的研究来说在并没有什么显著发展的状态下便进入了 20 世纪。

20 世纪初，随着无线通讯技术的发展，要求具有性能好的检波器。1904 年包士（Bose）和敦俄第（Dunwoody）及 1907 年佩斯等研究出 PbS、SiC、Te、Si 等所谓的矿石检波器，然而，在 1904 年佛列明和 1906 年福奥列相继发明了真空二极管和三极管之后，直到超短波和微波通讯中广泛应用矿石检波器类似的半导体检波器之前，矿石检波器就销声匿迹了。

1925 年随着量子力学的完成，开辟了物质性质研究的理论基础。因此，从 20 世纪 30 年代开始对半导体理论的研究也得到了

迅速的发展。1931 年威尔逊提出了半导体理论基础的模型。同时 1931 年认识到了矿石检波器和金属整流器的作用都是在半导体和金属接触界面上产生的。1932 年由威尔逊和诺得海(Nordheim)、1939 年由莫特(Mott)和肖特基逐渐完成了整流理论。但是，1938 年由达维多夫首先在整流理论中引入了 PN 结的概念。

从 1931 年开始，在无线通讯技术方面，对通讯容量大的超短波和微波应用兴旺起来，并提出了作为检波器比真空管高频特性好的半导体检波器，因此，人们对 Si 和 Ge 引起了重视。1935 年奥尔对半导体检波器所用的材料 Si 开始进行了研究，这样，从 1939 年开始 Si 检波器在微波通讯中被使用。随着 Si 检波器进入工业化生产阶段，在赛兹（Seiz）的领导下对高纯度 Si 进行了研究，1942 年已做出了 99.9%以上纯度的 Si，然后对掺杂进行了研究。比如，1943 年德拉发现，在 Si 中掺入微量硼元素时，Si 检波器的特性非常好。对 Ge 的整流特性早在 1925 年由美利特(Meritt)发现，并在 1941 年由西门子公司做成商品化产品。1941 年由斯卡夫确认了在 Si 或 Ge 中掺入 V 族或Ⅲ族元素杂质时，它们形成施主或受主杂质而得到 N 型及 P 型半导体，并观察到了在分凝时可以得到 PN 结的事实。

随着 Si 和 Ge 检波器研究工作的进步，发现了理论和实验的不一致性，尤其重要的问题是，在半导体上接触的金属针种类对整流特性几乎不给出影响的实验事实与理论不一致。1946 年边择(Benzey)基于对 Ge 的各种实验结果，不得不提出了 Ge 表面存在某种表面层的假设。另外，1947 年巴丁提出了表面能级密度大时，半导体表面形成电二重层而控制整流特性的假说，以此企图说明实验事实。对表面能级早在 1932 年由达姆（Tamm）指出过，并在 1939 年由肖克莱从理论上进行了分析。巴丁则把表面能级的存

在与现实检波器联系起来，成功地说明了其实验结果。对表面能级的更详细研究导致了晶体管的诞生。

贝尔研究所的肖克莱、巴丁和布拉顿为了证明表面能级的假说，从1947年开始进行了很多实验。布拉顿在进行实验中，偶然发现了晶体管的作用。也就是在半导体表面互相紧挨着接触的两根探针之间产生了相互作用，即一个探针中的反向电流，受到另一个探针的正向电流很大影响的效应，这就是1948年的点接触晶体管的开始。后来由肖克莱对这种晶体管的工作原理进行了分析，即从发射极向N型Ge注入的空穴被电场吸引到集电极的少数载流子的工作原理。在这种点接触晶体管没有实际应用的状态下，出现了PN结型晶体管。它没有被实际应用的理由是这种点接触晶体管的接触是不稳定的，而且，接触点直接暴露在空气中而其特性不稳定。

1949年肖克莱发表了PN结理论，并提出了PN结型晶体管制备的可能性。通过实验证实后，他于1951年发表了PN结型晶体管的理论。肖克莱的一系列研究成果对以后的电子工业带来了革命性的变化，但这些研究的完成和发展是与材料技术上的进步分不开的。由于Si的提纯及单晶生长比Ge难的多，因此，当时主要是以Ge为主进行了实验。1949年虽然发表了PN结理论，但工艺技术水平还未达到能够做出所希望的PN结晶体管。1950年哈尔（Hall）等在Ge衬底片两面进行施主和受主的扩散做出了PN结，同年特尔等根据直拉法首次成功地做出了Ge单晶，也在同年做出了肖克莱所预言的PN结型晶体管，即生长结型晶体管。

生长结型晶体管试制成功之后，加速了工艺技术的进步，制备方法也有了各种各样的改进。1952年提出了合金结型并用此方法做出了Ge二极管、Si二极管、整流器和晶体管。待它们的优秀性能得到证实之后人们便进行了工业化生产。

PN结型晶体管现在也是基本形式之一。1960年以后出现了MOS型晶体管，这种晶体管的工作原理与PN结型的完全不同，为了区分起见，PN结型晶体管有时也被称为双极性晶体管，原因是PN结型晶体管是同时利用电子和空穴的两种不同极性载流子的缘故。而在MOS型晶体管中则只利用其中之一的一种载流子，在这种意义上MOS型有时被称为单极性晶体管。

PN结型晶体管是从1951年开始制作的，但开始时频率特性不好，这是需要解决的问题。到了1954年，生长型、合金型的PN结晶体管的α-截止频率已升到数百MHz。1954年发表Si太阳能电池的贝尔研究所，不仅研究了固态扩散法，还研究了其广泛范围的基础研究。到1956年发表了扩散型晶体管，即所谓的台面晶体管。在扩散法中，不但容易控制杂质浓度，而且基极宽度也容易做到1μm以下，还可以利用漂移效应，因此，它是提高α-截止频率的最好方法，结果也成了制造半导体器件的最重要的方法。

到1960年，人们把扩散型晶体管结合上几种新技术，大幅度地提高了其性能。其中之一的新技术就是外延生长技术，在这种新技术中，由于可以降低集电极的电阻而提高了输出特性，而且响应速度也非常快，这种晶体管被称为外延晶体管。另外一个新技术是平面晶体管工艺技术，它是在Si表面上形成SiO_2膜，它除被作为选择扩散的掩膜使用之外，还可以作为表面保护膜使用。因此，具有前所未有的稳定性和可靠性等的特点的这种新技术为进入集成电路时代打好了基础。

半导体技术也可以说是控制杂质的技术，即使把它说成杂质工程也不过分。由于杂质含量一般为百万分之一，所以半导体母体必须是高纯度材料才行。要得到这种高纯度材料，只用化学提纯方法是不够的，还需要利用分凝现象的物理提纯方法。

1950年哈尔首先使用了分凝现象的提纯方法。1953年范

(Pfann) 发明了改进的区熔分凝提纯方法而对半导体技术做出了显著的贡献。由于 Si 的熔点高达 1 415℃，并且其熔液在化学上很活泼，提纯非常困难，因此，它比 Ge 的实用要晚很长时间，但从 1954 年开始被广泛使用起来了。先用化学方法提纯到 99.999%以上的纯 Si 之后，再在真空中与赤热的 Ta 或 Mo 线接触进行热分解而得到高纯度多晶 Si 棒。为了再进行物理提纯，采用悬浮区熔法，并得到高纯单晶硅。

MOSFET 与 PN 结型晶体管的工作原理完全不同。在前面已说过，这种晶体管的构想在很早以前便开始提出了，但由于工艺技术的问题而未能早日实现。直到平面工艺技术出现之后，Si 氧化膜 (SiO_2) 的形成使 MOSFET 得以实现。也就是说，被 SiO_2 膜保护的 Si 表面是非常完整的，与在空气中接触的表面完全不同。平面晶体管工艺技术不但使集成电路的实现成为可能，也使 MOS 型晶体管和 MOS 型大规模集成电路的出现成为可能。根据动作特性，MOS 型晶体管分为耗尽型和增强型两种。

MOS 晶体管的结构简单，集成化时除了特殊情况之外不需要隔离技术。它是电压控制型器件，其输入阻抗大，而且可得到大的输出电压，因此，集成化时，以少数器件可以形成电路，耗电也少。MOS 型大规模集成电路的发展很快，现在已发展成为超大规模集成电路的主流。

集成化的思想是从真空管时代开始的，进入晶体管时代以后，由于有源器件本身已成为超小型化，所以人们便积极开展了对微型组件、薄膜电路等各种方式的微型电路的研究。微型组件是在规格化陶瓷衬底上装上薄膜状电路器件或者扁平的小型部件，并把好几个衬底重叠起来进行布线的结构，空间利用率虽然比以前的电路提高很多，但由于增多了布线焊接部分而可靠性方面还存在问题。薄膜电路是在一个绝缘衬底片上，利用蒸发方法形成一

个电路所需的全部部件和布线，只是把有源器件再另外装上的结构，它不仅提高了部件密度，而且由于焊接点少而提高了可靠性。这种薄膜电路是在与半导体集成电路的结构基本上相同的基础上发展的，而且随着半导体集成电路的完成，以混合集成电路形式继续发展到现在。

电子计算机的迅速发展导致了半导体集成电路的出现。1959年以固体电路的名字公开发表集成电路之后，20世纪60年代实现了半导体集成电路。在1mm见方的半导体表面上形成数十个到数百个器件，而且由于其优异的性能和部件、材料、器件、电路为一体化的子系统，在电子产业界受到人们的极大重视。如前所述，半导体集成电路是以外延技术和平面晶体管工艺技术以及后来发展起来的MOSFET技术为基础而发展起来的。

随着集成电路的发展和通过各种技术改革，20世纪80年代进入了超大规模集成电路时代。从1965年到1980年的15年间，集成度每年以2倍的速度增加。进入90年代后集成度的发展速度有所减慢。提高集成度的因素有：一是芯片面积的增大；二是微细加工技术的进步；三是隔离方式、布线方式和电路方式等的改进。其中的微细加工技术的发展潜力很大，以前使用的紫外线，由于受到其波长（0.4μm）的限制，作为实用设计标准的线幅只能达到2μm。因此，紫外线微细加工技术达到的集成度界限为64K位，也就是刚刚到达超大规模集成电路的门栏。波长更短的电子线和X线的利用引起了人们的重视，用电子束或X线描绘电路图案时，线幅可以达到亚微米级，对腐蚀技术的改善来说，在制备超大规模集成电路时，使用干腐蚀法，由于它除不使用化学剂而具有无公害优点之外，还有提高精度、工艺过程简单化、自动化容易等的长处，这种干腐蚀法有：等离子腐蚀法；溅射腐蚀法；离子腐蚀法等。

随着集成度的提高，对衬底的大直径化和高品质化的要求也提高了。主要用直拉法制备大直径单晶，并对其微缺陷的研究也取得了相当的进步。在 Si 熔点 1 415℃附近温度的精确控制已达到±0.2℃，制备单晶的技术也已达到全自动化。随着单晶的大直径化，现在，代替高频加热主要使用电阻加热法，这样就可以制备出质量好的直径在 130mm 以上，长为 1 米以上的 Si 单晶。

集成度越高，外延层的厚度就逐渐减薄。现在可以制备出亚微米厚度的外延层。为了提高外延层质量，大多采用减压外延法。利用化学气相生长的 CVD 法是从外延技术的进步中派生出来的制备薄膜的技术，它已成为超大规模集成电路的主干工艺技术，尤其是减压 CVD 法在膜厚的均匀性、均质性、批量生产方面具有优越性，从而代替了常压 CVD 法，即包括低温氧化膜制备（500℃以下）在内的所有减压 CVD 法已占主导地位，同时也利用等离子 CVD 法制备 Si_3N_4 纯化膜。

随着半导体超晶格材料的出现，半导体技术从杂质工程进一步发展到能带工程技术。普通的半导体材料是自然界存在的，人们只是把它们重新提纯以及制备成各种形式的单晶来使用。但是，半导体超晶格材料完全是人工制造的材料，而且它的能带结构也是人为控制的，因此把它称为能带工程。这种新型材料一开始是不被人们理解的。1987 年，作为半导体超晶格材料创始人之一的江崎先生在来到长春市中国科学院长春物理研究所和吉林大学访问参观时说了他的亲身经历。他的第一篇有关半导体超晶格的文章投到物理评论学报社时，当时的主编看了之后，以看不明白为由被退回来了，他不得不在 1972 年 IBM 研究报告学报上发表了。他还说，1958 年他发明的隧道二极管文章开始时也受到了很多人的怀疑眼光，但后来在一次国际会议上受到了很多人的肯定。当时肖克莱对他的评价很高，说量子力学中的隧道效应，竟是在半

导体器件中验证了，这是非常了不起的发明。

江崎本人开始研究 GaAs/AlGaAs 半导体超晶格时，只是想利用这种结构的材料得到伏安特性中的负阻效应，但后来通过很多人的理论和实验研究，揭开了半导体超晶格的深远意义，因此，江崎在 1973 年获得了诺贝尔奖。利用半导体超晶格材料的能带工程可以制备出很多新功能材料和器件，预计到 21 世纪可能就是半导体超晶格的时代了。

第三篇
计算机技术

第一章　电子计算机出现之前的计算工具

1.1　算盘

最早的人造计算工具是算筹，算筹就是用来进行计算的筹码，通常是竹制的或木制的小棍，也有用骨制的，我国古代劳动人民利用他们智慧的双手最先创造了这种简单的计算工具，在当时解决了许多实际问题。

我国古代数学家使用了这种算筹，使我国的计算数学在世界上处于遥遥领先的地位，为早期的数学做出了杰出的贡献。祖冲之就是用算筹算出 π 值是在 3.1415926 和 3.1415927 之间，这一结果比西方早了近 1000 年。求这个值，需要对这样多位数进行包括开方在内的各种运算达 130 次以上，就是今天我们用纸和笔算也是很困难的，但祖冲之居然借助算筹把它算出来了，从而可见他的聪明才智。今天还在广泛应用被称为“秦九韶程序”的解高次方程增乘开方法，列方程和方程组的天元术、四元术，著名的中国剩余定理以及我国精密的天文历法等都是借助算筹运算取得的。

算盘是由算筹演变而来的。在筹算数字中，上面一根筹为5，下面每一根筹为1；算盘中上档一珠也为5，下档每一珠也为1；由于筹算在乘、除中出现某位数字等于10或多于10的情形，所以算盘采用上二珠下五珠的形式。

珠算到底何时产生，难以详考。东汉徐岳的《数术记遗》中已提到“珠算”，甄鸾的注释说它只能做加减法，不能做乘除法，它似乎不是宋、元后的算盘。14世纪元朝陶宗仪在他的《辍耕录》中把婢仆贬作算盘珠“拨之则动”，元曲中也有“去那算盘里拨了我的岁数”的唱词。在文学、戏曲中都用算盘珠作比喻，说明了算盘在当时已经比较普遍。可惜许多早期关于珠算的著作如《盘珠集》、《走盘集》等失传了，真正的珠算出现时不是一下子就很完善的，珠算和筹算并存、竞争了一个时期，终于在元中叶后取代了筹算。

1.2 欧洲出现的两种计算器

在欧洲的文艺复兴运动中，一大批人文主义思想家、改革家向教会的宗教统治提出了挑战。艺术大师达·芬奇就是其中之一，他一面画着带有迷人的永恒微笑的蒙娜丽莎的画像，一面解剖着死尸、研究着物理学，同时还设想制造一个计算机。他打算设计一台加法器，但是，由于条件的限制未能实现自己这一宏伟的设想。

哥白尼以后，天文学发展进入了一个新的时期，天文学中遇到的大量的繁重的计算工作，使天文学家们特别关心计算工具的改革。随着钟表业的产生和发展，使人们考虑像钟表这样的装置可以用齿轮传动来完成，那么也可以用这种装置来改造计算工具。1623年，德国人威尔海姆·什卡尔特（Wilhelm Schikard）在写给开普勒（Kepler）的信里，详细介绍了他设计的一种计算机，它主

要是由加法器、乘法器和记录中间结果的机构等三部分组成的。加减分别由带有10个齿的齿轮与相应的传动装置来进行。乘法要用绕在转轴上的乘法表来进行，除法则化成重复加减进行，进位机构是连接轴上只有一个齿的辅助齿轮。遗憾的是，什卡尔特的样机模型还没有完成就被一场大火烧毁了，他的设计思想也很少为人所知。

计算工具改革的重要一步是由一个法国年轻人迈出的。他就是后来成为著名数学家的巴斯卡尔（Blaise Pascal），他的父亲从事税务工作，父亲繁重的计算工作给巴斯卡尔幼小的心灵以很强的刺激，他立志设计一种工具来减轻父亲繁重的计算工作。

1642年，在他只有19岁时就研制了一台能做加法和减法的计算器，用一个个的齿轮表示数字，利用齿轮啮合装置，低位的齿轮每转十圈，高位的齿轮就转一圈，这样就实现了进位，计算器上面有一排窗口，透过窗口可以看到算得的答案。对应于每个数字轮，都配有一个拨盘，在进行加法运算时，每个拨盘都先拨“0”，让每个窗口都显示“0”，然后拨被加数，再拨加数，窗口就显示出和。在进行减法运算时，先要把计算器上面的金属直尺往前推，盖住原先的那一排窗口，并露出它下面的窗口，接着拨被减数，再拨减数，差值就自动显示在窗口上，他的机器虽比较简单，但实际上却包含了后来广泛使用的手摇计算机的基本原理。

巴斯卡尔的计算机吸引了很多人，其中最著名的人物是莱布尼兹（G. W. Lebniz）。莱布尼兹最突出的成就就是提出了直接进行机械乘法的设计思想。

莱布尼兹计算器是一个长100厘米、高25厘米的盒子，主要由不动的计数器和可动的定位机构两部分组成。不动部分有12个小读数窗，分别对应带有十个齿的齿轮，用以显示数字；可动部分有1个大圆盘和8个小圆盘，用盘上的指针确定数字，然后把

可动部分移至对应位置，并转动大圆盘进行运算。可动部分的移动用一个摇柄控制，整个机器由一套齿轮系统传动。莱布尼兹计算器的主要部件是梯形轴，即带有不同长度齿的小圆柱，圆柱的齿像梯形的样子。这种梯形轴是齿数可变的齿轮的前驱，有助于顺利实现比较简便的乘除运算；同时，把机器分为可动与不动部分的设计，导致滑架移位机构的产生，简化了多位数的乘除运算。莱布尼兹的这两项发明，长期为各式计算机所采用，在手摇计算机发展史上做出了重要贡献。

莱布尼兹的计算器及其设计思想，引起了巴黎科学院和伦敦皇家学会极大的兴趣。为此，在1673年，莱布尼兹被选为巴黎科学院院士和伦敦皇家学会会员。

莱布尼兹对计算数学的另一个重要贡献是系统地给出了二进位制的算术运算法则，指出了它们用于某些理论研究中的优点。莱布尼兹关于二进制的思想是从哪里来的呢？据他自己说，他认为世界上最早的二进制表述是中国的八卦。他曾经和当时在康熙皇帝身边工作的法国传教士白晋（J. Bouvet）通信，知道中国古代由阴（－－）阳（—）两爻构成八卦。他用二进制的方法对八卦的构成进行了描述，还撰写了研究八卦的数学内容的论文。

1.3 差分机

在巴斯卡尔和莱布尼兹的带动下，不少人从事计算机的改进工作，从这时起到可以实际应用的台式手摇计算机的出现，大约又经历了一个多世纪，真正的机器是从18世纪才开始有的，这主要不是设计思想问题，而是由于技术条件还不具备的缘故。1818年，法国人托马斯（C. Thomas）设计了一种比较实用的计算机，并在1821年建厂投产，首批生产了15台，从而开创了计算机制造业。

在托马斯的台式机械计算机的基础上，后来的发明家进行了一系列的技术革新。瑞典人奥涅尔（W. Odhner）从1874年开始，整整花费了15年的时间，发明了一种齿数可变的齿轮，用来代替莱布尼兹的梯形轴，从而设计成功了一种新型计算机，这种计算机的结构和外观更接近于我们现在比较熟悉的式样，直到20世纪20年代，奥涅尔机都是一种主要的计算机器。

不过，到此时为止，所有的机器只能做简单的四则运算，还根本没有涉及程序的控制。直到19世纪中叶以后，计算机同法国的纺织技术的重大革新——程序自动控制思想结合起来，一些新型的计算机才登上了历史舞台。其中值得特别介绍的就是英国数学家拜比吉（Charles Babbage）设计的“分析机”，这是一种顺应计算机自动化半和自动化的程序控制潮流的通用数字计算机。在现代电子计算机诞生100年前，他已经提出了几乎是完整的设计方案，这似乎是一个奇迹。当时，拜比吉企图用纯机械结构来实现他的思想，但这一点是无论如何也做不到的。他的这种思想只有在100年后电子学发达的20世纪才大放异彩。

1810年，拜比吉进入剑桥大学学习，在大学学习期间，他发现英国1766年编定的航海表中有许多错误，这种错误势必影响到航海中的准确定位。制表工作需要进行大量的数字运算，尽管耗费大量人力仍难免出错，如何把人从简单但却繁琐易错的计算中解脱出来呢？拜比吉产生了制造一台自动制表机的强烈愿望。他搞了很多设计，其中最有价值的设计思想是从法国人普罗尼组织制表工作的实践中吸取的。

1822年，拜比吉制成了一台可以运转的差分机模型，它包括三个寄存器，每个寄存器是一根固定在支架上的带有6个字轮的垂直轴。每个字轮代表十进位数字的某一位，字轮上有10个可辨位置分别代表阿拉伯数码0～9。这些寄存器同时又是运算器，它

们可以保存3个10万以内的数并进行加法运算。这种差分机能制表的范围很窄，是一种专用机。它仅能做加法运算，和当时一般的计算器相比似乎是倒退了。但是，它的重要意义在于，它不仅是每次完成一个算术运算，而且能按照设计者的安排自动地完成整个运算过程，这无疑已经蕴含了程序设计的萌芽。拜比吉制造样机的成功，证明了这类差分机非常适合用来编制天文和航海表。

1822年，拜比吉正式向英国政府申请提供资金来实施他的计划。同年，他写信给皇家学会主席，详细说明了这个计划：用2～3年时间，制造一台有7个寄存器，每个寄存器可保存一个20位的数字的差分机。它可以为六次多项式 $a+bN+cN^2+dN^3+eN^4+fN^5+gN^6$ 制表。机器还有自动印刷结果的部件，以避免人工抄写可能出现的差错。财政部基于这类机器对政府，特别是对海军很有实用价值的目的而决定投资。整个工程在英国著名机械工程师克莱门特的工厂进行，但制造工作遇到不少困难，进展并不如意。10年过去了，花费了30 000英镑，机器并没制成。到1832年，工作停顿下来了。1842年，英国政府宣布废除这项合同。第二年，拜比吉的全部图纸和那台半路夭折的机器都被送交伦敦皇家学院博物馆保存。

拜比吉的工作虽然失败了，但和他同时代的瑞典人舒茨(Georg Seheutz)改进了他的设计，在瑞典科学院的资助下，从1852年起仅用了两年的时间就造出了一台差分机，并在1855年的巴黎展览会上荣获金奖。至于拜比吉，在1832年制造工作基本停顿时，他已经开始在设计一种可以控制计算程序的通用数字机了。

1.4 分析机——现代通用数字机的雏型

1934年，拜比吉完成了一项新设计，这种新设计的计算机有

专门控制运算程序的机构。而机器的其余部分可以进行各种具体的数字运算。拜比吉新的分析机主要由三部分组成：

（1）保存数字信息的齿轮式寄存器，拜比吉称之为“堆栈”，即仓库的意思。“堆栈”内有100个寄存器，这部分的构造和差分机差不多，关键是运算已不在这些寄存器内进行了，而由新的机构进行运算。

（2）从寄存器取出的数据进行各种运算的装置，拜比吉叫它“工场”。它也是由很多“轴”组成的，利用各种齿轮及齿轮的咬合、脱离、旋转、平移等机械原理，把数据从“堆栈”的“轴”上提升传送到“工场”的“轴”上以备运算。

为了加快运算速度，拜比吉设计了先进的进位机构，这是分析机中最重要的部分，有了它，50位加50位的操作只需一次转轴即可完成。在乘法运算上，拜比吉的方案是先算出被乘数的1～9倍这9个最基本的倍数，并将其存入寄存器，然后在做乘法时由选择机构提取所需的倍数加到部分积上，这就保证了运算速度。他估计他的机器做加减法可达每分钟60次；完成两个50位数的乘法只需要1分钟（比第一台电子计算机约慢100倍），这种速度在当时是够理想的了。

（3）控制操作顺序、选择所需处理的数据以及输出结果的装置。这部分装置实际上起到了现代计算机中控制器的作用，拜比吉的这一设计是受到了加卡提花机穿孔卡的启示，然后将这种穿孔卡技术移植过来的。

拜比吉还有几个非常出色的设计思想，他设想了一种现在叫做条件转移的指令。即在用分析机解题时，可以根据某个被计算结果的正负号，从可能继续运算的两条路线中选择一条做下去。这一极为重大的创新，标志着机器不仅能代替人的具体计算，而且开始代替人的逻辑判断，它是实现现代电子计算机设计的很关键

的思想。另外，拜比吉为了控制卡片的重复使用次数，不断地改进了一种卡片记数装置，这也是现代计算机设计所具有的重要特性，它使得在还不能决定某些运算所需次数的情况下，仍可以编制程序。为了进一步提高运算速度，拜比吉使机器能够使用各种预先制好的函数表格。

确实，拜比吉的分析机已经包括了现代计算机设计的一些主要思想。拜比吉的所有这些设想，汇集在大约 30 种不同的方案、200 张以上的图纸(其中画了几万个零件)以及他的大量工作笔记中。但是分析机的命运并不比他的差分机好。他没有得到政府的财政支持，于是他只得用自己越来越少的财产坚持工作。但是，要完成整机的所有功能所需的各部分间的联结实在是太复杂了，技术上无法实现；更重要的是在那个时代，社会对这类机器尚无迫切的需求。结果，他创造的光辉精神财富全部被锁进了历史博物馆。而后来的 20 世纪的发明家不得不艰难地重新走一遍他所走过的设计之路。

1.5 模拟机

与数学家们设计的以数字形式来进行其基本运算的计算机不相同的另一支计算工具是模拟机，它们的创造者是一批物理学家，包括伽利略、麦克斯韦、凯尔文、迈克逊等，他们对此都做出过重要贡献。

模拟机与数字计算机有所不同，它是通过对某种连续物理量的运算与测定来解决实际问题的。物理学家在总结自然规律的同时，常常要用数学语言、数学方程的形式来描绘某一过程。那么对于一个相反的过程，即对于一个给定的数学方程，能否设计出一种机械装置，其运动恰好与这些方程相对应呢？如果可以，那么解数学方程就可以让相应的物理模拟来完成。这是一个睿智而

深刻的思想，只有物理学家才可能站在这一与数学家完全不同的立场上来考虑问题，模拟机的研制工作就是沿着这一思路发展起来的。

比机械计算器稍早出现和并行发展的各种类型的计算尺，可以被看作是最早的模拟计算工具，这也是由物理学家开创的。17世纪初，意大利科学家曾介绍了一种类似圆规的比例规。伽利略(G. Galileo) 比例规是根据三角形对应边成比例的原理和比例规上事先划好的刻度而设计的，它可以用来作乘除、求比例中项、开平方、开立方等各种计算。对数发明以后，1620年，英国人甘特(E. Gunter) 制造了一种计算尺，它可以把乘除法化为加减法进行计算。1632年，英国人奥特瑞 (W. Oughtred) 又发明了圆形计算尺，到了17世纪中叶以后，逐渐出现了带有游标与滑尺的现代型的计算尺。当时，由于科学技术水平还不够发达，所以，计算尺是很流行的计算工具。牛顿不仅用计算尺解二次和三次方程，而且还很重视计算尺的设计工作；他提出了另加“滑标”以作指示之用的具体建议。18世纪以后，人们设计制造出了适于各种要求的普通计算尺和专用计算尺，计算尺可以说是最原始的模拟计算工具。计算尺上的各种刻度用到了长度这个最简单的物理量，并利用长度的变化进行计算。

另一种早期模拟装置是所谓的积分仪，它最先由一位德国工程师于1814年发明，但对后来的模拟机发展影响较大的则是麦克斯韦于1855年制造的那一台。如果把积分运算化为数字运算，那就非常繁复了，而用积分仪来处理就很简单、麦克斯韦的模拟装置后经汤姆逊改进为著名的圆盘-圆球-圆轴式积分仪，这成为后来许多模拟机的基础。

19世纪数学物理的一项重大成就——傅立叶分析对模拟机的发展起了直接的推动作用。1807年，傅立叶建立了把一个周期

函数可以分解为一系列简谐振动函数的方程式之后，物理学家随之考虑的是如何简单地计算傅立叶系数问题，1876 年，物理学家凯尔文利用他的兄弟汤姆逊的圆盘-圆球-圆轴式积分仪成功地制造出第一台计算傅立叶系数的机器，他把其称之为“潮汐调和分析仪”。凯尔文的调和分析仪能计算的傅立叶系数的项数相当有限，因为当项数增加时，误差的积累便破坏了结果的精确性。美国物理学家迈克逊与莫雷(E. W. Morley)1887 年在对光学的研究中，由于频繁地使用傅立叶分析，从而迫切需要提高傅立叶分析仪的精度。于是，他同工程师斯特雷顿 (S. W. Stratton) 合作，采用弹簧元件，于 1898 年制成了一台处理 80 项傅立叶系数的分析仪。

另一类重要的模拟机是微分分析仪。这是一种用来解算微分方程的装置。第一台真正的微分分析仪是 1930 年出现的，负责制造这台机器的是美国工程师布什(V. Bush)。为了解计算电机工程中经常遇到的二阶常微分方程，布什从 1927 年开始与哈森 (H. Hazen)合作制造微分分析仪。这台机器的数学原理是解常微分方程的逐次迭代法，为了实现这种迭代过程，布什在机器中同时使用了 6 个汤姆逊式积分仪。

到 20 世纪 30 年代为止，这段时间中设计制造模拟机的活动相当活跃，甚至有些人产生了可以用模拟机来解决一般科学计算问题的想法。例如布什在完成第一台微分分析仪之后，便着手采用电气元件来改造他的装置以便制造出更普遍适用的模拟计算机。但在实际工作中，人们逐步看到了模拟装置在通用性、精确度以及速度这三个方面上的局限性。特别是当人们试图推广微分分析仪以使其能适用于偏微分方程计算时，便更加明显地感到了模拟装置的不足，因此，一旦条件成熟，人们的注意力便又转向了数字计算机。

第二章　早期的电子计算机

2.1　机电计算机

第一个采用电器元件来制造计算机的人是德国工程师朱斯(K. Zuse)。早在1934年，朱斯就致力于计算机的研制，当时他正在学习土木工程，在没有资助的困难条件下开展研究，尽管如此，他设计的第一台计算机Z-1号还是于1938年完成了。这是一台纯机械结构的机器，运算速度慢，可靠性也差。朱斯决心采用电磁继电器来改进Z-1，但不久由于应征入伍而中断。后来他获准免除军役继续从事他制造计算机的工作，并取得政府的资助。1941年，他的Z-3计算机开始运转，这是世界上真正的第一台通用程序控制计算机。Z-3计算机不仅全部采用继电器，同时还采用了浮点记数法、二进制运算、带数字存储地址的指令形式等。

德国战败后，朱斯流亡到瑞士一个荒僻的乡村。他的兴趣转移到了软件方面并提出了关于计算机程序设计的理论。而他所设计的Z-3计算机已于1944年的飞机轰炸中被炸毁，他在战时制造的计算机仅有一台Z-4残存下来。

与Z-3几乎同时的另一台通用程序控制计算机就是霍华德·艾肯(Howard Aiken)所制造的MARK-I计算机。艾肯于1937年提出了他的计算机设计，他当时还是美国哈佛大学物理系的研究生，IBM公司支持了这个年轻人，1939年派出四位有经验的工程师与艾肯合作。1944年，这台程序控制的自动数字计算机宣告完工，在哈佛大学投入运行。MARK-I只是部分采用了继电器，主要用作科学计算，由于继电器开关速度(1/100秒)的限制，使计算机的速度也受到限制。MARK-I乘两个23位数需要4.5秒。在

1945 年至 1947 年间，艾肯又领导制造成功了一台全部使用继电器的计算机——MARK-Ⅱ。在计算机发展史上，MARK-I 和 MARK-Ⅱ有着重要的地位。

在此前后，美国贝尔电话公司以史梯别兹（G. R. Stibitz）为首的一个小组也开始研制继电器式计算机，他们的第一台机器完成于 1940 年，这是一台用于电气网络复数计算的专用机，因此被称为“复数计算机”，后来也被称为 Model-Ⅰ号。1940 年，Model-Ⅰ号在美国数学会表演获得了巨大成功。从 1944 年起，史梯别兹一班人开始制造通用机——Model-Ⅴ号，这种型号的机器于 1946 年完成，并被认为是现在的多处理机系统的雏形。

艾肯等人制造的这一批机电计算机是计算机发展史上短暂的一页，因为这些机器的典型部件是普通电话继电器，这使计算机的运行速度大受限制；另外由于 20 世纪 30 年代以来已经具备了制造电子计算机的能力，继电器式计算机从一开始就注定要很快被电子计算机所取代。当然，这些机电计算机也为早期电子计算机的设计制造积累了重要的经验，对于现代的高速电子计算机的发展起到了开路的作用。艾肯、朱斯等人后来都转变成为出色的电子计算机设计者。

2.2 第一台电子计算机——ENIAC

20 世纪科学技术的飞速发展，带来了数不清的数据处理问题，因而对计算机的改进和提高提出了迫切的要求，而军事上的需要显得更为迫切。

在第二次世界大战中，美国宾夕法尼亚大学莫尔学院电工系同阿伯丁弹道研究实验室共同负责为陆军每天提供 6 张火力表，这项任务非常困难和紧迫，因为每张表都要计算几百条弹道，而一个熟练的计算员用台式计算机计算一条飞行时间 60 秒的弹道

要花20小时，用大型的微分分析仪也需15分钟。虽然聘用了200多名计算员，一张火力表也往往要算两三个月，而形势的迫切需要根本不允许延误，所以问题相当严重。当时，负责阿伯丁实验室同莫尔电工系小组联系的军方代表是年轻的数学家戈尔斯坦(Goldstine)中尉，他的朋友莫克利这时正好在莫尔学院电工系任职。于是，莫克利于1942年8月提出了一份题为《高速电子管计算装置的使用》的报告，这个报告实际上是第一台电子计算机ENIAC的初始方案。戈尔斯坦立即意识到这一设想对解决制造火力表的困难的巨大价值，他马上向上司做了汇报，很快得到了军方的支持。按照军方的要求，1943年4月2日莫尔学院负责与阿伯丁实验室联系的勃雷纳德(J. G. Brainerd)教授提出了一份制造一台电子数字计算机的发展计划的报告。一周以后，经过军方负责人和专家顾问以及勃纳雷德、莫克利等人参加的会议讨论，制造电子计算机的计划得到通过。6月5日莫尔学院和军械部正式签定合同，这台机器被命名为“电子数值积分和计算机”(Electronic Numerical Integrator and Computer)，简称ENIAC，制造第一台电子计算机的工作就这样开始了。

在制造ENIAC当中，也遭到了一些非议和责难，有一批专家和工程界人员认为ENIAC不见得比继电器装置的机电计算机好，电子计算机制造时间长而且耗费大等。莫尔学院提出的方案需要采用18 000只电子管、70 000只电阻、10 000只电容，预算经费是150 000万美元，所以，ENIAC计划确实是冒着巨大的风险进行的。

然而承担研制ENIAC的莫尔小组是一批具有朝气的青年科技工作者，24岁的埃克特担任总工程师负责解决工程技术中的复杂问题；莫克利是30多岁的物理学家，他提出了电子计算机的总设想；年轻的戈尔斯坦中尉不仅能在数学上提供有益的建议，而

且具有科研组织的才干，此外还有年轻的逻辑学家勃克斯(A. W. Burks)参加。1945 年，经过两年多的艰苦努力，这台标志人类计算工具历史性变革的巨型机器宣告竣工，正式的揭幕典礼于 1946 年 2 月 15 日举行，这台机器 1947 年被运往阿伯丁，起初是专家用于弹道计算的，后来经过多次改进而成为能进行各种科学计算的通用计算机。

ENIAC 的最大特点就是采用了电子线路来执行算术运算、逻辑运算和储存信息。ENIAC 的电子线路有三种：用作电子开关的符合线路；用来汇集来自各个来源的脉冲的集合线路；用以计算和存储的触发器线路。为了执行加减运算和存储数据，采用了 20 个加法器，每个加法器由十组环形计数器组成，可以保存一个字长 10 位的十进制数，为了执行其他的计算，还采用了乘法器、除法器和开方装置。由于有 20 个累加器，ENIAC 又具有另一个重要优点，即可同时执行几个加法或减法，在这一点上，ENIAC 与 Model-V 同是 60 年代出现的并行计算机的前身。ENIAC 同以往计算机相比最突出的特点是高速度，它比已有的计算机快 1 000 倍。ENIAC 占地面积 170 平方米，耗电功率为 150 千瓦，确实是一个庞然大物。

ENIAC 的主要缺点是：第一，它的存储容量太小，至多只能存 20 个字长 10 位的十进制数；第二，它与后来的“存储程序”型的计算机不同，它的程序是“外插型”的，很不便于使用，仅为了进行几分钟或上小时的数字计算，准备工作就要用去几小时甚至一两天时间。

在 ENIAC 制造过程中发现这些缺点后，为了解决弹道计算的急需问题，人们必须另找一种新的途径。在 1944 年，美国陆军要求莫尔学院在建造 ENIAC 的同时立即设计更高效率的计算机。同时，在这段时间里，在建造大型存储器方面已有了突破性

的进展，其他技术也有新的进展，因而，研制一种新的高效率电子计算机的条件已经具备。

2.3　EDVAC 的研制

1944 年 8 月至 1945 年 6 月，在莫尔学院举行的定期会议上，专门讨论了世界著名数学家冯·诺依曼（W. Neumann）与莫尔小组积极合作制定的一个全新的存储程序通用电子计算机方案——EDVAC 方案（后来，人们通常称它为冯·诺依曼机）。图 3.2-1 为冯·诺依曼像。在计算工具漫长的发展史上这短短的 10 个月里，这个具有崭新的科学思想、富有创造性、长达 101 页的 EDVAC 方案诞生了。



图 3.2-1　冯·诺依曼

EDVAC 方案明确规定了新机器有 5 个构成部分：(1)计算器 CA；(2) 逻辑控制装置 CC；(3) 存储器 M；(4) 输入 I；(5) 输出 O；并描述了这五个部分的职能和相互关系。EDVAC 方案有两个非常重大的改进：一是为了充分发挥电子元件的高速度而采用了二进制；二是提出了“存储程序”可以自动地从一个程序指令进到下一个指令，其作业顺序可以通过一种称为“条件转移”的指令而自动完成。“指令”包括数据和

程序，把它们用码的形式输入到机器的记忆装置中，即用记忆数据的同一记忆装置存储执行运算的命令，这就是所谓存储程序的新概念，这个概念被誉为计算机史上的一个里程碑。解决了存储程序不仅解决了速度匹配问题，而且还带来了在机器内部用同样的速度进行程序的逻辑选择的可能性，从而使全部运算成为真正的自动过程。

EDVAC 方案是计算机发展史上一个划时代的文献。它向世界宣告：电子计算机的时代开始了。从此，人类掌握了解放智力的伟大的工具。

但是，世界上第一台存储程序计算机并不是 EDVAC，而是英国剑桥大学数学实验室制成的 EDSAC（1949 年投入运行），其领导人威尔克斯（M. V. Wilkes）就是在 EDVAC 方案提出来以后在莫尔学院开办的“电子数字计算机设计的理论和技术”专门课程讲座的听课者。美国首先推出的同类机器是 1950 年完成的 SEAC 机。EDVAC 直到 1952 年才姗姗来迟，在美国名列第四。这是什么原因呢？原来，它的设计组经历过一次大的更动：在 1945 年底，ENIAC 刚刚竣工，设计组的专家们就因发明权的问题闹得不可开交，小组陷于分裂。就这样，这个创建了计算机发展中里程碑的小组就自行解体了，EDVAC 的制造陷于困境。相反的，那些参加莫尔学院“电子数字计算机设计的理论和技术”专门课程学习班的英、美专家却首先造出了同类机器 。

2.4 普林斯顿高级研究所与 IAS 计算机

20 世纪 40 年代中期到 50 年代初，由于战争结束，莫尔学院的领导对电子计算机的研制不再采取支持态度，集结在该校的计算机领域的一些著名学者与专家纷纷离开，研制 ENIAC 的主要成员莫克利和埃克特离开了学校，开办了电子控制公司。伟大的

计算机思想家冯·诺依曼、研制 ENIAC 的重要成员勃克斯与戈尔斯坦都来到了普林斯顿高级研究所，从而它就自然而然地取代了莫尔学院，成为美国计算机的研制中心。

研究所制订了电子计算机计划，研究工作包括逻辑设计与程序设计、工程技术、数值计算方法、数值气象预报四个方面，对计算机一系列重要领域进行开拓性工作。计划的主要目的是研制“完全自动的数字型通用电子计算机”，它被以高级研究所（The Institute for Advanced Study）的名字命名为 IAS 计算机。整个工作由冯·诺依曼担任主任，戈尔斯坦任副主任，比奇洛（Julian H. Bigelow）和波墨林（James H. Pomerene）先后担任总工程师。这支研究队伍分工协作，一面进行实验室建设，一面进行机器设计。

1946 年 6 月勃克斯、冯·诺依曼和戈尔斯坦完成了题为“电子计算机逻辑结构初探”的著名报告，以后又发表了几篇论文，这些报告比 EDVAC 方案更为完整，详细地描述了存储程序计算机的体系结构，具体地探讨了这种计算机如何组织、程序如何编制制等，可以说这是现代通用计算机的奠基石，流传很广，影响巨大。

IAS 计算机与 EDVAC 这一类串行计算机不同，它是一台并行计算机。串行计算机逐位顺序运算，而并行计算机各位同时运算。并行计算机需要有一个能并行存取的存储器，IAS 采用英国曼彻斯特大学教授威廉（F. C. William）发明的一种电子射线管——威廉管作存储器，容量为 1024 个字，字长 40 位。这种并行存取的静态存储器比 EDVAC 所使用的串行的延迟线动态存储器快得多，存取一个数仅需 15 微秒，而后者需要 500 微秒。另外 IAS 还首次采用了异步控制器，它与同步控制器不同，不受固定拍节工作的限制，一个操作完成后，下一操作立即开始。

由于采用上述新技术，IAS 计算机加减法速度比 EDVAC 快

一个数量级，并且结构紧凑、节省器材，全机只用了 2 300 支电子管，而 EDVAC 却用了 3 000 支电子管和 8 000 支二极管。

在美国原子能委员会和军事部门的支持下，IAS 的研制工作进展很快，于 1951 年夏交付使用，1952 年正式交机。洛斯·阿拉莫斯实验室的一批科学家在这部机器上进行了热核武器方面的大量计算，机器连续工作 60 天，仅发现五六个错误，在速度上比 ENIAC 快 240 倍。

IAS 计算机的新颖设计给许多计算机带来了极大影响，阿伯丁弹道实验室的 ORDVAC、伊利诺斯大学的 ILLIAC、兰德公司的 JOHNNIC、原子能委员会洛斯·阿拉莫斯科学实验室的 MANIAC、阿尔贡国家实验室的 AVIDAC、奥克·里奇国家实验室的 ORACLE 等计算机都是模仿 IAS 制造的。IBM 公司最早投产的 IBM 701 及其他计算机，也在很大程度上继承了 IAS 的设计。而且 IAS 计算机对德国、瑞典、原苏联等国家的计算机的最初发展也有很大影响。

第三章　20 世纪 50 年代的计算机

20 世纪 50 年代电子计算机的特点就是走向实用化。计算机事业在 50 年代中发展最快的是美国，英国、法国、原苏联等欧洲主要工业国家虽然也较早地开展了电子数字计算机的研究与试制工作，但经济实力不如美国，而且在第二次世界大战中受到严重创伤尚未恢复，所以发展缓慢。美国计算机的发展在这一时期中实现了三个转变：

1. 由军用开始转向民用。
2. 由实验室试制进入工业化生产。
3. 从科技计算扩展到数据处理。

3.1　由军用开始转向民用

20世纪40年代的通用电子计算机仅处于试制阶段，所造出来的计算机主要供国防尖端研究部门与军事部门使用，研制经费也大多由这些部门提供。最早制成的存储程序计算机SEAC与SWAC是由美国空军提供研制经费的，研制的目的是为了检验技术成熟程度，为制造大型快速计算机做准备。普林斯顿高级研究所研制的IAS由军械部出钱，首先用于解决核武器方面的题目。按照IAS仿制的几台计算机大多是用于装备原子能委员会的三个实验室和阿伯丁弹道实验室的。

1945年，麻省理工学院的随动机械实验室开始研究在模拟飞机工作中使用计算机技术，根据海军提出的要求，拟设计一台专供进行风洞数据处理、设计新型飞机用的模拟计算机。第二年，计算机实验室领导人富利斯特(J. Forrester)注意到了新出现的电子数字计算机的发展趋势，决定将其改为数字计算机，于是开始了名为“旋风”(Whird wind)计算机的研制工作。旋风计算机和IAS计算机一样，也采用了并行运算，但字长短（旋风16位，IAS 40位）主频高（旋风4兆赫，IAS 1兆赫），旋风计算机使用了5 000支三极管、11 000支二极管，体积庞大，它首先采用了边缘校验'技术，提高了可靠性。

旋风计算机于1951年设计完成，由于防空形势的需要，美国空军将其用于SAGE防空系统之中。为了从空气动力学计算改变为实时控制，因此对旋风计算机进行了一系列改造：为了提高可靠性，用磁心存储器代替了电子射线管存储器；为了进行远程信息收集与实时处理，增添了交互式显示器、数模转换器和磁鼓，连接了大量的通信电路和终端设备等。

由于旋风计算机采用磁心存储器，缩短了存取周期，运算速

度提高了一倍，加法达到 24 微秒，乘法为 40 微秒，平均速度达到每秒 35 000 次，从而使该机成为当时运算速度最快的一台计算机；同时在可靠性方面也有很大提高，存储器的平均故障间隔由两小时提高到两周。这样，旋风计算机在速度与可靠性方面都能满足当时实时处理的要求。另外加上它的容量大、价格便宜，因而对电子计算机的实用化起到了关键性的作用。

20 世纪 50 年代美国还研制了一系列的计算机，以满足军事与国防尖端技术发展的需要，如在 1954 年底制成的 NORC(Naval Ordnance Research Calculator) 大型机是供海军使用的，1956 年中研制成的 AN/FSQ-7 大型专用机是供防空系统指挥中心使用的，这些计算机就当时来说具有技术先进的优点，对计算机发展有着重大影响。

总之，在 20 世纪 50 年代里，电子计算机主要服务于军事和国防尖端技术，在另一方面，所研制的计算机和围绕它所进行的研究工作为计算技术的发展奠定了基础。同时，电子计算机及这些研究成果开始并很快地转为民用，成为工业产品，这反过来又促进了计算机工业的成长和发展。

3.2 计算机开始工业化批量生产

在 20 世纪 50 年代，由于科技和生产发展需要，加上计算机技术的发展，计算机开始由单机试制转向工业化批量生产。美国第一台电子数字计算机 ENIAC 的主要设计者和试制者莫克利和埃克特，1946 年离开了莫尔学院，开办了电子控制公司，1948 年改名为埃克特·莫克利计算机公司，开始研制世界上第一台批量生产的计算机 UNIVAC-I。

UNIVAC-I 是在 1945 年冯·诺依曼等人提出的 EDVAC 方案的基础上发展的，是一种串行、同步控制的计算机。它和以往

的计算机不同之处在于：它不仅能做科学计算，而且能做数据处理，从而为计算机进入一个新的广阔的应用领域开辟了途径。1951年3月，第一台UNIVAC-1交付美国人口统计局使用。当1952年美国进行总统选举时，使用了UNIVAC-1统计选票和预报选举结果，当投票刚结束时，计算机就根据选票的初步统计而预告艾森豪威尔当选总统，从而它轰动了美国。

UNIVAC-I采用112根水银延迟线作为存储器，主频2.25兆赫，加法每秒2 000次，乘法每秒400次，全机用了3 500支电子管。该机的突出特点是：首先采用磁带机作为外存储器，最早采用了奇偶校验方法和双重运算线路来提高系统可靠性，并且首先进行了自动编程的试验。这些都是计算机技术发展史上重要的一页。

埃克特·莫克利计算机公司为研制UNIVAC-Ⅰ耗资很大，在经济上遇到了很大困难。雷明顿·兰德公司从1950年起就开始逐步收买和吞并这个小公司，并组织了UNIVAC-Ⅰ的小批量生产。从1951年至1955年，UNIVAC-Ⅰ共生产了20台，大多售给军事部门、研究单位和政府机关，后来也售给一些大企业，如通用电器公司、美国钢铁公司和西屋电器公司。

雷明顿·兰德公司除了吞并埃克特·莫克利计算机公司之外，还吞并了另一家拥有许多技术专家的ERA公司。ERA公司从事计算机开发很早，技术力量很强，从1951年末起先后制成了ERA 1101、ERA 1102、ERA 1103计算机。雷明顿·兰德公司由于拥有了埃克特、莫克利、诺里斯、克雷等专家而实力大增，该公司的产品在1951年至1953年这段时期里几乎独占了美国计算机市场。

20世纪50年代中期，IBM公司兴起，取代了雷明顿·兰德公司。IBM公司的前身为CTR公司，1925年更名为IBM公司，一

直从事研制计算机工作，1944 年与 1947 年先后制成了继电器计算机 MARK-1 和 MARK-2，1948 年制成了电子管与继电器混合的大型计算机 SSEC，还生产了一批卡片程序计算机。但在进入存储程序电子计算机市场中却晚了一步，发展也比较缓慢，这主要是由于公司一些领导人对电子计算机的认识不足，缺乏战略眼光。1951 年，冯·诺依曼担任了该公司的顾问后，向公司领导及技术人员介绍了电子计算机在科学上的应用及其意义，并提出了一系列有充分科学依据的重大建议，加上新上任的公司总经理小沃森对计算机技术发展的重要性有深刻的认识，因而决心扭转公司的局面，全力投入电子计算机的发展和生产。

IBM 公司推出的第一个批量生产计算机是 IBM 701，第一台 IBM 701 于 1952 年制造完成，安装在 IBM 纽约计算中心。IBM 701 是一台科学计算用大型机，字长 36 位，采用一地址、并行运算结构，用威廉管作为主存储器，容量为 2 048 字，存取周期为 12 微秒。全部使用了 4 000 支三极管，12 000 支锗二极管，定点加法运算速度为每秒 12 000 次。这台机器的特点是外围设备比较齐全，配置有磁鼓、磁带机、卡片输入/输出机、打印机，而且几台卡片输入机可并行工作。第一台制成后，接着从 1953 年 3 月到 1954 年，公司以每月交付一台的速度，一共生产了 18 台，出售给大研究所、大公司、大学和政府部门。为了使 IBM 701 作为工厂产品，IBM 公司开始注意生产工艺和标准化，采用了插件组装形式，以便安装调试；该公司还注意了程序的可互换性，以便用户在买到机器之前可以在别的 IBM 701 上编制和调试自己的程序。

IBM 701 制成后不久，公司开始了 IBM 702 的研制工作，IBM 702 是一台数据处理用的大型机，能进行字符处理，输入输出能力很强，采用威廉管作为主存储器，1954 年制成，一共生产了 14 台。

自 IBM 701 推广以后，公司决定大批量生产一种小型机——

IBM 650，这种小型机价格比较便宜，适于大批量生产、大范围应用。

IBM 650 是一台以磁鼓作为存储器的十进制的小型机，磁鼓容量为 2 000 字，字长为 10 位，平均取数时间为 24 毫秒，以串行定点方式执行十进制运算，机器运算速度较慢，加减法平均每秒 200 次，乘法每秒 100 次。它的一个很大特点是与 IBM 卡片统计机具有继承性和适应性，它同样使用 80 行穿孔卡片作为输入输出介质，卡片统计机一些设备可原封不动地加以使用。而且，IBM 650 操作简便，机器内部具有多种校验，工作比较可靠，平均故障间隔时间在 40 小时以上。为了编制程序方便，机器配有汇编程序 SOAP 以及输入输出程序、浮点十进制运算程序、双精度运算程序等多种服务程序和许多应用程序。该机后来还被进行了改进，运算速度有了提高，并可增配磁盘机、磁带机，从而扩充为具有相当功能的中型机。由于 IBM 650 具有这些优点，所以深受用户欢迎，第一台机器于 1954 年 12 月问世，原估计可销售 250 台，但后来实际销售量超过千台，被广泛地用于工程计算和经营管理上，从而成为第一代计算机中行销最广的机器，掀起了计算机工业化生产的第一个高潮。

1955 年、1956 年 IBM 公司又先后推出了科学计算用大型机 IBM 704 与数据处理用大型机 IBM 705，这两台新机器比原来的 IBM 701 和 IBM 702 有很大改进，性能有了显著提高。机身上采用磁心存储器取代了电子射线管存储器，增大了存储器容量，缩短了取数周期，提高了可靠性。IBM 704 设有浮点运算部件，大大提高了浮点运算速度。IBM 704 还设有变址寄存器，并首次配上了 Fortran 程序设计语言，从而极大地方便了使用。IBM 705 加强了输入输出能力，计算处理与磁带的写入和读出可重叠进行，从而增强了机器的解题效率。IBM 704、IBM 705 作为第一代计算机中

具有代表性的大型机获得了很大成功。IBM 704 原计划生产 50 台，实际上销售了 130 台；IBM 705 预计出售 75 台，实际售出 125 台。这在一定程度上反映了美国当时的计算机生产规模与应用水平。

1958 年 11 月，IBM 704 的改进型——科学计算用的大型机 IBM 709 制成，它继承了 704 的系统结构与基本技术，同样采用存取周期为 12 微秒的磁心存储器、容量为 8 192 字的磁鼓，但 IBM 709 用了输入/输出通道和间接地址新技术，增加了数据处理指令，因而既实现了程序兼容，方便了用户使用，又适当扩充了功能，受到了用户的欢迎。IBM 709 是 IBM 公司性能最高的也是最后的一个电子管计算机产品。

美国计算机生产开始于 1952 年，20 世纪 50 年代中期年产计算机几百台，计算机工业初具规模；到 50 年代末计算机生产规模已扩大到年产上千台。从计算机行业看，50 年代初期最大的企业是雷明顿·兰德公司；到 50 年代中期则由 IBM 公司所取代；到 50 年代末期，生产计算机的主要公司已增加到十多家。IBM 公司、雷明顿·兰德公司和宝来三家公司的计算机产量已占美国计算机总产量的 80%以上，其中 IBM 公司一家独占 60%以上。至此，美国计算机的工业结构格局已基本形成。

3.3 计算机在 20 世纪 50 年代对科技方面的作用

在 20 世纪 50 年代中，由于电子计算机的快速运算，解决了科技领域中许多在此以前不能解决的问题，从而推动了现代科学技术革命的进程。它促进了原子物理、空气动力学、宇宙航行等一系列最有前途的学科的迅速发展；在尖端的科学技术领域，它对热核武器、核潜艇、超音速轰炸机、运载火箭与洲际导弹的设计、制成和发展等方面都做出了重要的贡献；在一般的科学技术

与工程设计方面，如数学、物理，力学、化学、天文、晶体结构分析、石油勘探与开发、桥梁设计、土木工程设计、大地测量等，也加快了研究步伐，提高了设计工作的进度和工程质量，促进了各门科学技术的现代化。下面仅就几个方面做简单的介绍：

1. 航空与航天技术

在设计活塞式发动机的飞机的当时还没有计算机，只有依靠手摇和机械式计算机，而设计超音速飞机时，依靠手摇和机械式计算机是根本行不通的，必须使用电子计算机。美国最大的飞机制造公司，如道格拉斯、洛克希德和波音公司，在20世纪50年代安装的大型计算机数量是最多的。截至1957年，投入运行的31台IBM 704大型机中有10台装在这些公司里。这些计算机主要用来进行飞行器结构设计、有关空气动力学方面的复杂计算、处理风洞数据以及进行人造地球卫星与运载火箭轨道计算等。

2. 核武器的研制

在热核武器研制过程中遇到最大的障碍就是大量的计算和数据处理问题，这也是最关键的问题。在美国热核武器的早期研究阶段，ENIAC发挥了重要的作用。但是到1951年进行试验设计阶段时它却无能为力了。当时，冯·诺依曼领导研制的IAS计算机以及仿IAS的MANIAC等计算机相继制造完毕，其性能比ENIAC高出40倍，因而解脱了当时的困境，推动了热核武器研制工作的进展。后来，美国核武器研究中心——利弗美尔实验室利用大型计算机研制成功小型战术核武器和北极星弹道的核弹头。

3. 气象预报

气象科学研究也是涉及大量计算和数据处理的一个领域。早在20世纪20年代，当英国学者理查德森(L. Richardson)提出他的数值天气预报模型时，即已面临大量计算的难题。他设想了一座“天气预报工厂”，其中有64 000个数学家同时工作，才能完成

所需的计算，理查德森只好望洋兴叹，他写道："也许在遥远的将来，有一天我们能比天气的发展更快地进行天气预报计算……，但这是一个梦。"20 世纪 30 年代末和 40 年代初，天气预报的研究发展到了一个新的阶段，其特点是寻找适用于天气预报的流体力学方程，由于预报方程非常复杂，出现一些利用图解法或手工计算的近似方法。不久就发现，这些近似方法所做的简化非常粗糙，经常歪曲了现象的物理本质，而精确的计算又需要数量惊人的计算人员。因此，为了逾越天气预报理论发展与其实际应用之间的鸿沟，科学家们急切盼望高速电子计算机的到来使数值气象预报成为可能。20 世纪 50 年代初期 24 小时数值天气预报开始实现，这是气象预报的一次革命。之后，随着电子计算机性能的提高和数学模型的改进，计算精度不断地提高，预报范围不断扩大，准确性也不断提高。

3.4 计算机进入企业经营管理

20 世纪 50 年代，由于生产连续化、自动化水平不断提高，生产和流通的规模越来越大，管理工作越来越复杂，需要处理的数据量与日俱增，时间性要求越来越高，这迫切地要求采用电子计算机这种先进工具来提高数据处理的效率和质量，以促进管理经营现代化。

1954 年，美国通用电气公司首先安装了 UNIVAC-Ⅰ，从事工资计算和成本合算，几千人的工厂只需 4 个小时就可算出每个工人的工资，并自动打印出支付单据。1955 年蒙山都化学公司、IBM 波普西工厂等企业也开始试用计算机进行工资计算、销售统计和成本计算等财会业务与统计工作，有的还用于库存管理，都取得了很好的效果，但是计算机刚开始进入企业管理时也遇到了一些问题。这主要由于企业管理中使用计算不是单一的计算工作，

而往往涉及整个管理系统和管理方法的变动，从报表格式、资料分类到名词的统一编码都需要重新研究和进行大量的准备工作；而且数据处理、应用对计算机本身也提出了一些新的技术要求，需要改进计算机系统结构、系统配置和程序设计方法。例如：要求系统结构采用字符编码、可变字长，具有丰富的字符和字符串操作指令；要求系统配置有大容量磁盘机、磁带机；尤其是希望程序设计简化，具有适合数据处理用的程序设计语言等。经过了几年的技术改进和提高，有关的计算机技术先后逐一成熟，例如，1956 年制成了磁盘机 RAMAC 350，存储容量达 5 兆字符，并可随时查询和修改，很适合于库存管理等方面的使用；在软件方面，继数据处理语言 Flow-Matic 之后，1959 年出现了面向商业的通用语言 COBOL；IBM 公司和其他计算机公司还建立起了可供用户选用的丰富的标准子程序和现成的程序包。加上适合当时多数用户使用、价格比较便宜的中小型数据处理计算机的出现与发展，使许多企业有条件使用它，并感到经济实惠。于是到 1958 年、1959 年，计算机广泛地扩展到大、中企业经营管理当中，促进了管理现代化。如国际哈佛斯特公司卡车部是一个现代化的汽车生产企业，车销售额为 5.5 亿美元，生产各种用途、样式的轻重卡车 100 多种，若把各种底盘采用不同的车轮计算在内，则派生的车型达 700 种，而每一种底盘主要零部件有 2 000 多种，所以工厂生产具有品种多、产量大、生产工艺复杂、内外协作关系多、物资吞吐量大等特点 。过去，企业管理数据处理靠卡片统计机，手续繁、人工干预多、效率低、准确性差，满足不了指挥生产的要求。为此，安装了一台 IBM 705 大型机，处理生产经营管理各项数据，保证了数字的正确性和报表质量，提高了时效，也提高了企业管理水平，促进了企业进一步发展。

到 1959 年，在美国安装的 2 600 台计算机之中，已有三分之

二用于企业经营管理，涉及的面有保险公司、银行、制造工业、石油公司、铁路与航空运输部门、政府机关等广泛的领域。在制造工业里，以汽车、飞机、机械、电子电气设备制造等方面企业用得较多。应用范围比以前扩大，应用水平也有了提高，从单项作业开始发展到多项作业，从财会统计发展到经营管理，如编制生产计划、作业计划、统计报表、成本核算、销售分析、利润预测、采购定货、库存管理等。尤以库存管理用得较多。现代化大生产消耗物资品种多、进出库数量大、占用资金多，使用计算机进行库存管理，可以及时掌握进库与库存物资动态，从而达到压缩库存、加快资金周转、保证生产的目的，在这些方面已取得了明显的经济效益。

美国采用计算机辅助经营管理的首先是大企业，随后才逐渐扩展到中等规模的工商企业。到 1958 年，美国年销售额在 10 亿美元以上的 34 家大公司全部使用计算机进行数据处理，而其中最大的 5 家公司：通用电气公司、美国电报电话公司、通用汽车公司、道格拉斯飞机公司、通用电力公司就使用了 38 台大型机、100 台中型机。美国 500 家大公司中有一半采用了计算机进行经营管理，还有不少营业额为数千万美元的企业以及少数营业额仅为几百万美元的企业，在经营管理业务上也使用了计算机。这些企业使用的大多数是月租金为 3 000～6 000 美元的小型数据处理计算机，这些企业均收到了经济实效。

第四章　20 世纪 60 年代电子计算机的发展

在 20 世纪 60 年代里，计算机技术有两次重大飞跃：第一次是 20 世纪 60 年代初的电子管计算机停止生产、晶体管计算机的大批量生产，计算机进入第二代时期；第二次是 20 世纪 60 年代

中期，由于集成电路的出现，计算机很快进入了第三代：集成电路计算机。计算机技术的这次重大变化带来了计算机生产与应用的迅猛发展。美国计算机年销售额由 1960 年的 5 亿美元增至 1970 年的 60 亿美元；美国计算机年生产量由 1960 年的 5 500 台上升到 1970 年的 70 000 台。在应用方面已推广到各个领域并得到了广泛应用。

4.1　第二代计算机及 IBM 系列

1947 年，晶体管研制成功，不久之后美国的计算机科学工作者就着手研究如何将晶体管应用到计算机上。最初开发的晶体管计算机是军用计算机。1954 年贝尔实验室开始为空军研制一台晶体管计算机 Leprechan，1956 年宣布制成，这台小型计算机字长 18 位，首次采用直接耦合晶体管逻辑电路。全机使用了 5 000 支晶体管，磁心存储器容量为 1 024 字，但整个机器只有落地式音箱那么大，所需功率只有 160 瓦。

1955 年初，麻省理工学院开始研制 TX-2 大型晶体管计算机。为此先做了一个模型机 TX-0，这台模型机于 1956 年 4 月制成。TX-2 则于 1957 年制成，这是一台大型并行定点计算机，是在旋风计算机基础上发展起来的，在元件、线路和系统结构上都采用了一些新技术，主存储器采用电流重合法磁心存储器，工作周期为 6.5 微秒，容量为 65 000 字，比旋风计算机采用的 4 096 字存储器大十几倍。机器运算速度也相当快，加法每秒 15 万次，乘法达 8 万次。

1958～1959 年，开始有一批晶体管计算机产品相继投入市场。美国第一个批量生产的晶体管计算机是飞歌公司的 S-2000，于 1958 年 11 月问世，接着是 IBM 7090、NCR 304、RCA 501、Honey well 800 等也陆续投放市场。到 1960 年，各个公司开始大

量生产各种型号的晶体管计算机，从而使计算机正式进入第二代。几乎与此同时，英国、德国、法国、日本也相继转入第二代计算机时期。

在第一代计算机向第二代计算机过渡的过程中，IBM 公司重视了计算机产品的继承性，1958 年生产的 IBM 709 就继承了 IBM 704 的系统结构与基本技术，缩短了新机器研制周期，降低了生产成本，实现了程序兼容，方便了新机器的使用。同时 IBM 709 也采用了一些新技术，适当地扩充了功能，有效地提高了性能，使产品富有竞争力。其他一些计算机厂家也采用了这种在继承基础上改进的方针。

接着 IBM 公司于 1960 年 1 月将 IBM 709 晶体管化，衍生出 IBM 7090 并投入生产。IBM 7090 在系统结构上没有根本性变革，但采用了一系列新技术，除了电路晶体管化以外，还采用了存取周期 2.18 微秒的快速磁心存储器，每台容量为一兆字节的磁鼓，后来又增配了每台容量为 2 800 万字节的固定磁盘，因而使 IBM 7090 的计算有效速度比 IBM 709 快几十倍。同时，IBM 7090 还配置有 FORTRAN 和 COBOL 高级程序设计语言，使用户使用起来极为方便。其后 IBM 公司在 IBM 7090 基础上又衍生出了更多的机型。1962～1964 年，IBM 公司先后推出了 IBM 7090 的改进型 IBM 7094 Ⅰ和 IBM 7094 Ⅱ，IBM 7094 Ⅰ提高了机器主频，增加了双倍精度运算的指令，增强了机器的解题能力。IBM 7094 Ⅱ采用了存取周期为 1.4 微秒的磁心存储器，进一步加快了运算速度。与此同时，IBM 公司又在 IBM 7090 的基础上先后制成规格稍小、价格较低、技术新颖的 IBM 7040 和 IBM 7044，以期获得推广。于是就构成了 IBM 704、IBM 709、IBM 7094 Ⅰ、IBM 7094 Ⅱ、IBM 7040、IBM 7044 一个以科学计算为主的大型计算机系列。这个计算机系列在 1955 年到 1965 年期间是美国科学计算的主力，

尤以 IBM 7090 等晶体管计算机用户为多，总共出租出售了 500 多台，广泛用于原子能、航空与航天技术、导弹研制、军事指挥系统、气象以及其他方面的科学研究和工程设计。

在大型数据处理计算机方面，IBM 公司形成了另一个计算机系列。首先是 1954 年生产的 IBM 702，接着 1955 年开始生产 IBM 705，而后又推出改进型 IBM 705 Ⅱ、IBM 705 Ⅲ，1960 年又在 IBM 705 Ⅲ 的基础上制成了晶体管化大型数据处理计算机 IBM 7080；在中小型通用机方面，IBM 公司也形成了一个计算机系列。以 1955 年生产的仅带卡片机的 IBM 650 作为开端，经过改进扩充，发展成配有磁盘机、磁带机的 IBM 650，从 1959 年起又在这部电子计算机的基础之上先后衍生出了晶体管计算机 IBM 7070、IBM 7074 和 IBM 7072，并也组成了系列。

4.2　IBM 1401 系列小型机的推广

晶体管小型机出现以后，由于它的体积大大缩小、使用方便、价格便宜、运算快捷和工作可靠等特点，它很快取代了卡片机系统及电子管计算机，在工业、商业、银行、保险公司、政府机关、铁路和军事部门中得到广泛应用。

小型数据处理计算机 IBM 1401 一出台就受到广大用户的青睐，在短短四五年间共销售了 9 000 多台，连同在它基础上改进、扩充的三种型号计算机，一共销售了 14 000 多台，从而进入小型机广泛发展的一个新时期。

IBM 1401 小型晶体管计算机首先采用了晶体管电路、磁心存储器、印刷线路这些先进技术，性能比第一代小型机 IBM 650 提高了一个数量级，主机体积大大缩小。该机采用以字符为单位的可变字长结构，比较灵活；主机规模较小，主存容量一般为2 000～4 000 字节，存取周期为 11.5 微秒，每秒定点加法 4 000 次；外

围设备能力强，如拥有每分钟打印 600 行的宽行快速打印机，每分钟能输入 800 张卡片的高档卡片输入机，并可根据需要选择配置低档或高档的磁带机、固定磁盘存储器以及可直接“阅读”票据的磁墨水符号识别装置 。IBM 1401 还配置有汇编语言和 COBOL 语言以及一些服务性程序，使一般管理人员经过学习就能掌握使用。一部最小配置的 IBM 1401（卡片机、打印机各一台）售价仅 125 000 美元，月租金为 2 475 美元，价格便宜，用户从中获得了明显的经济效益。

IBM 1401 不仅广泛用于商业数据处理，还可作为大型机 IBM 7090 的辅助机，进行脱机输入输出。IBM 1401 先把卡片输入的信息转换到磁带上，进行必要的错误较正与编辑加工，然后再由磁带高速度地输入到大型机。

为了适应经济管理方面比较复杂的使用要求，1961 年在 IBM 1401 的基础上又发展了处理能力更强的 IBM 1410 中型机，1962 年与 1963 年又先后制成了 IBM 1440、IBM 1460 计算机，从而构成了一个中小型数据处理计算机系列，并且很快推入市场，在推广应用上取得了很大成功。

4.3 Stretch 和 CDC 6600 高速大型计算机

在中小型机 IBM 1401 系列推广的同时，又根据科学计算和军事工程的需要，对计算机性能提出了更高的要求，如：20 世纪 50 年代中期，美国原子能委员会等研究机构提出了需要比当时运行的机器性能高两个数量级的计算机。因而一个研制每秒运算几十万次以至几百万次的高性能大型机的浪潮正在兴起。当时，这种类型的计算机在美国有尤尼瓦克公司的 Larc、IBM 公司的 Stretch 和控制公司的 CDC 6600，在英国有曼彻斯特大学与弗兰弟公司合作研制的 Atlas，在日本有日本电气试验所研制的 Mark-

6，它们的研制对提高计算机技术水平起了关键作用，其中，尤以Stretch和CDC 6600影响为最大。

Stretch计算机主要是想用于解决反应堆设计、流体力学和偏微分方程等方面的问题。根据设计要求，Stretch是一部以科学计算为主，兼顾数据处理、实时应用的超大型计算机系统。这个系统计算精度高、速度快、容量大。机器字长为64位，每秒浮点运算100万次，磁心存储器容量为96 000字，配有大容量磁盘存储器。在软件方面配有汇编程序、编译程序和多道管理程序等。

为了达到比IBM 740快100倍的目的，公司决定在采用新技术和新的系统结构两方面下功夫。在开发新技术方面，IBM决定研制新元件、新线路、新部件和新的组装技术，如采用截止频率近100兆赫的NPN和PNP高速漂移晶体管作为基本元件、研制级延迟为10毫微秒的电流开关线路、研制字长为72位、存取周期为2微秒、容量为16 384字的快速磁心存储器，研制速度较快的大容量磁盘机作为辅助存储器；在新的系统结构方面采用先行控制技术，中央处理机各部件同时工作，最多可重叠执行6条指令。主存储器采用了6台磁心存储器（每台16 334字）的交叉存取方式。可以在0.5微秒之内存取一个数或是一条指令。Stretch还引入了交换器和多道程序使中央处理机与输入输出设备并行工作，显著地提高了整个系统的效率。

Stretch是一部巨大而复杂的计算机系统，它的速度很高，可靠性良好。它除了采用晶体管元件提高可靠性外，还采用了一些自动检错纠错的措施，例如：它首次采用海明纠错编码，它能自动纠正一位错误、发现多位错误，从而使存储器的可靠性显著提高。它不仅适用于科学计算，而且适用于商业数据处理与军事上的实时控制，是一个具有较全面的操作能力的系统。然而，在1961年正式投入运行后，并没有达到原来的预定指标，运算速度只达

到预定计划的百分之五六十，原定快速运算器执行浮点加法操作为0.5微秒、乘法为1.4微秒，实际上只达到浮点加法操作为1.5微秒、浮点乘法为2.7微秒，由于性能降低，售价从1 350万美元下降到800万美元，一共生产了7台。IBM公司为此亏损了2 000多万美元。所以说：Stretch计算机在商业上是败的；但是，它本身所起的作用和它采用的新技术、新构思却对计算机的发展做出了重要的贡献。

尽管Stretch没有完成预定指标，但它仍然是一部速度很高的计算机，比IBM 704快五六十倍，在20世纪60年代初期是一部性能最高的计算机，在原子能、大气研究等领域计算了许多以前无法解决的问题；它所采用的快速晶体管线路、快速磁心存储器等一系列新技术和先行控制技术等一系列新构思对后来计算机技术的发展产生了重大影响。

正当IBM公司研制的Stretch没有获得圆满成功的时候，一家规模小得多的控制数据公司在1960年接受了美国原子能委员会的委托，开始研制一部性能比Stretch更高的科学计算用大型计算机CDC 6600，速度为每秒运算300万次，主存储器容量为13万字，字长60位，并配有大容量磁盘存储器，CDC 6600比该公司原先生产的CDC 3200运算速度快15倍。该机主要用于解决大型科学计算问题，包括原子能、理论物理、地球大气的数字模型等。

负责CDC 6600设计的是控制数据公司的副董事长、最高技术负责人西蒙·克雷博士（Seymour Cray），他是一个富有独创精神、具有杰出才能和丰富经验的计算机总体设计师，他在CDC 6600的设计上，采用了多机处理机构的创新的系统组织，其特点就是采用中央处理机与多台外围处理机并行工作的结构。CDC 6600有1台中央处理机、10台外围处理机，每一台外围处理机都



图 3.4-1　西蒙·克雷博士

有自己的小存储器。这些外围处理机不仅具有加工输入输出数据和管理外围设备的能力，而且能承担大部分系统控制的操作，从而使中央处理机专门从事于执行计算量大的用户程序。这样既使中央处理机的结构有所简化，又能显著提高运算速度。从整个系统来说可以做到并行执行输入输出操作、系统控制操作和用户程序，从而充分发挥了效率。为了大幅度地提高运算速度，中央处理机具有 10 个彼此独立的专用运算器，其中有一个浮点加法器、两个乘法器、一个除法器、一个定点加法器、两个地址加法器、一个逻辑变换线路、一个移位线路和一个控制转移线路。当执行一条程序时常常可以有两三个运算器同时工作；中央处理机里还设置了用晶体管线路构成的指令站，它有 8 个高速寄存器，可以同时存放 8 条指令，因此，很多程序在执行重复计算时只需从指令站中取指令，而不必经过速度较慢的中央磁心存储器，从而减少了取指令的时间，加快了运算速度；同时，CDC 6600 中央存储器也采用了交叉存取的方法。中央存储器容量为 131 000 字，由 32 个独立的磁心存储体组成，每个存储体容量为 4 096 字，存取周期为 1 微秒。采用交叉存取的方法，可以使取数时间缩短到 1/10 微秒。CDC 6600 还设置了扩充磁心存储器，存储容量为 12.5～50 万字，以弥补中央存储器容量的不足。此外，还配置了容量

达1亿多字节的固定磁盘存储器，作为上述中央存储器和扩充存储器的后备，这样就大大增强了系统的解题能力。

由于CDC 6600比Stretch晚几年开始研制，这时的器件和电路等方面都有了很大进展，所以它立足的技术基础也比较优越，它采用了当时最新的晶体管——NPN型硅平面晶体管，这种晶体管综合应用了平面工艺和外延技术，是半导体器件制作方面一个划时代的成就，它大大地提高了晶体管的可靠性、稳定性和参数的匀一性，显著地提高了晶体管的开关速度，这种硅晶体管的寿命达到2亿小时，比20世纪60年代初期采用的锗晶体管提高了两个数量级。CDC 6600使用了40万支硅晶体管，因晶体管损坏而引起的机器故障平均每五六百小时一次。这部机器还采用了直接耦合晶体管逻辑电路，级延迟为5毫微秒。

CDC 6600第一台样机于1964年2月交付给美国原子能委员会利弗莫尔研究所，又经过半年调整试算，到1964年8月正式验收、投入使用。性能达到了预定的指标，当它用于科学计算时，其解题能力比Stretch高10倍，而售价却比Stretch低，每部为700万美元，后来进一步降到四五百万美元。因而深受美国、西欧各原子能组织、航空与宇航界、气象研究机构和大学的欢迎。像美国原子能委员会劳伦斯研究所、贝蒂斯研究所、诺尔斯研究所、日内瓦欧洲原子能研究中心、法国原子能委员会、宇航局卡兰德空军基地、美国气象局、纽约大学等都纷纷订购，美国核武器的最大研究机构——劳伦斯研究所竟先后购置了4台这种计算机。CDC 6600取得了巨大成功，控制数据公司在研究生产科学计算用高速大型机方面取得了领先地位。

1965年，CDC 6600转入批量生产，共生产了八九十台，这么大的机器生产这么多的数量是相当可观的。在CDC 6600制成后的几年里，它是美国解大型科学计算题目的主力。

克雷在研制成功CDC 6600之后，接着又领导研制水平更高的超大型机——CDC 7600，于1969年1月制成。这部超大型机继承了CDC 6600单主机、多外围机与多功能部件的结构，但大大缩短了主机基本周期，并采用了存取周期为275毫微秒的快速磁心存储器等技术手段，整机平均速度达每秒千万次浮点操作，成为20世纪60年代末、70年代初性能最好的计算机。

4.4　第三代计算机

1960年，第一批集成电路问世，但价格极为昂贵，每块高达450美元。随着生产技术和工艺水平的提高，集成电路价格不断下降，1963年，集成电路平均价格每块降到23.6美元，这已接近分立元件等效电路的价格水平，到1964年集成电路的价格比分立元件等效电路的价格还便宜一些，大量生产集成电路民用计算机的时机已接近成熟。

1964年4月7日，IBM公司在美国62个城市和40个国家同时举行记者招待会，会上推出了集成电路计算机IBM 360系列。当时推出的IBM 360系列有大、中、小型计算机6个型号：20、30、40、50、65、75。最小的型号360/20主存容量为4 000～16 000字节，运算速度每秒几千次，最大型号360/75主存容量为26～104万字节，平均运算速度每秒100万次。

IBM 360是采用混合集成电路的第三代计算机，它是最早采用集成电路、同时也是影响最大的第三代计算机。它在性能、成本、可靠性、组装密度等各方面都比以往的计算机好得多。在速度上：第一代大型机IBM 704乘法速度为每秒3 000次，第二代大型机IBM 7090为3万次，第三代大型机IBM 360/75达到37.5万次；在价格上：计算10万次乘法的价格，IBM 704为1美元，IBM 7090为20美分，IBM 360/75下降到3.5美分；计算机的可

靠性则随每次换代提高一个数量级以上；组装密度10年间提高了20多倍。

IBM 360系统配有多种多样的外围设备，包括大容量可换磁盘存储器、字符显示器、图形显示器、字符识别装置、终端装置等新型外围设备，以方便人机联系，进一步增强机器解题能力。在软件方面，配备也很齐全，不仅有汇编语言、FORTRAN、ALGOL、COBOL、PL/1等各种程序设计语言，而且首次配备上了功能较强的操作系统，以减少人工操作、提高整个计算机系统的效率。

IBM 360系统最重要的特点是通用化、系列化和标准化。IBM公司以往设计制作计算机是根据不同用途而制定不同的方案，如IBM 7090是用于科学计算的大型机，IBM 7080是数据处理用大型机，IBM 1401是数据处理用小型机，IBM 1620是科学计算用小型机，还有生产控制用计算机IBM 1700等。这些机器指令系统各不相同，彼此不能兼容。而IBM 360系统则是一个系列，具有多种用途。它之所以取名为360，就是用其来比喻罗盘上的360度，能适应任何应用领域，也就是全方位的含义。IBM系统具有丰富的指令、兼顾科学计算、数据处理和实时控制三个方面的应用；至于系列化的思想在第二代计算机时期就已经开始，但当时系列化的范围比较窄，如IBM 7090及其后继机是一个主要用于科学计算的大型计算机系列，而中小型机则另立系列，大、中、小型计算机分别设计，彼此缺乏内在联系。而360系列是大、中、小型计算机成龙配套，构成一个性能范围宽广的计算机系列。尽管各档机器规模大小、速度快慢不一，但具有共性，这就是采用相同的系统结构，在指令系统、数据格式、字符编码、中断系统、控制方式、输入输出操作方式等方面保持统一，从而保证了程序兼容。操作便利是360系列的一大特点，在标准化方面主要是采用

标准的输入输出接口，使得外围设备对系列内各个型号都能通用，而不必为每个型号设计生产独用的外围设备。另外，采用积木式结构设计，除中央处理机独立设计外，存储器、外围设备都采用标准部件成品组装。存储器可以根据需要在较大的范围内进行扩充，外围设备可以自由选型、安装，并可在使用过程中不断更新。

20 世纪 60 年代初，IBM 公司试图以一个范围宽广的通用计算机系列来取代第二代各种类型的大、中、小型计算机。这就是公司最高权力机构——执行委员会批准的 IBM 360 计划，从此开始了大力发展系列化、通用化、标准化的 IBM 360 系列产品。为此，在 20 世纪 60 年代初的几年中 IBM 公司总共投资了 50 亿美元，这是美国研制第一颗原子弹曼哈顿计划投资 20 亿美元的 2.5 倍，也是当时资本主义世界最大的私人投资。这个富于冒险性的战略计划是在 IBM 公司经过了一场激烈斗争后才决定下来的。

1965 年起 IBM 360 系列的各个型号相继问世，由于它具有通用化、系列化和标准化的特点，性能价格比高，所以取得了很大成功，成为世界上第一个也是当时最主要的通用计算机系列，到 1970 年 7 月 1 日止共销售了 32 300 台，其中 360/20、360/30 各销售万台以上。

IBM 360 系列的出现不仅对美国通用系列机的发展有很大影响，而且对世界各国通用计算机系列的发展也有很大影响。西欧和日本一些通用系列机都参照或仿照了 IBM 360 系统。1970 年原苏联和东欧各国也开始联合研制与 360 系统兼容的“统一系统”——EC。当时在世界范围内，向 IBM 360 系统靠拢、看齐已成为一种主要趋势。可见 IBM 360 系统不失为计算机发展史上的一个重要里程碑。

4.5 计算机联网

早在20世纪50年代中期，美国就开始出现了计算机联网。当时，麻省理工学院林肯实验室为美国空军设计了半自动地面防空警戒体系，简称Sage。1958年首先建成了纽约防区，以后在美国和加拿大国土上陆续建立了17个防区。IBM公司提供了总值7.6亿美元的36台计算机，系统发展公司花了1 800人年为它编制程序。每个防区的指挥控制中心装有两台AN/FSQ-7型专用计算机，通过通信网络连接防区内各雷达观察站、机场、防空导弹和高射炮阵地。计算机里存储着各种情况下的作战预备方案，对100多个雷达站送来的信息进行实时处理，一旦发生紧急情况，它可以帮助指挥员判断决策，自动引导飞机或导弹进行拦截。

军用计算机联网的经验很快转向民用，1963年美国航空公司订票系统SABRE投入使用。最初，在纽约订票中心安装的两台IBM 7090通过通信网络连接了国内36个售票处，后来这个系统逐步发展到连接环球400多个售票处的2 000多台电传打字机终端。任何一地的乘客订票只要一两分钟就可以获得结果，旅客若要取消订票、改换日期、续订下一程机票都很方便。这是第一个成功的民用联机计算机系统。

20世纪60年代中期，为了适应高度社会化大生产与现代科学技术发展的需要，工业、交通、金融、军事、气象等部门都迫切要求建立四通八达、迅速可靠的信息收集、分析与处理的联机系统。同时第三代计算机技术与数据通信所取得的进步也提供了联机技术大发展的可能条件，于是便出现了各种各样的实时联机系统——库存管理系统、商品调度系统、生产管理系统、铁路经营管理系统、银行业务系统、火车订票系统、城市交通管理系统、航天测量系统、跟踪系统、气象观察系统、情报检索系统等。这些

实时系统不仅大大提高了时效，而且使传统的工作方式产生了根本性的变化。例如，美国西屋电器公司首先建立了联机库存管理系统，远程计算中心安装了2台尤尼瓦克490大型计算机，经通信网络连接360个营业所、工厂和仓库。这个系统每天处理2 000件订货，计算机里存储着各地的库存情况。营业所通过终端把顾客订货品名、规格数量等信息送往计算机。计算机迅速查询，确定哪些仓库有此项货物、哪个仓库离订货单位最近、交货最方便。由于使用计算机自动管理库存和合理调拨物资，降低了库存额35%，仓库数由原来的26个减少到20个，并且改进了货物供应。西屋电器公司接着又着手建立一个规模很大的企业经营管理系统。总公司管理人员凭借这个系统可以及时掌握公司的生产、销售、库存、订货等方面的情况，从而使企业经营管理发展到了一个新的阶段。

分时（联机）系统的出现是计算机使用方式的重大革新，它进一步推动了计算机的普及与应用。分时系统把计算机时间轮流分配给分散在各地的用户，而每个用户都感到在独自使用一台计算机。第一个实际的分时系统——相容分时系统（CTSS）是美国麻省理工学院研制的，经过扩充的CTSS Ⅱ于1963年投入运行。一部IBM 7094 Ⅱ大型计算机连接112个终端，大部分装在实验室，一部分装在教授家里。这个系统最多可供30个使用者同时使用，从而使研究人员在家里可随时使用计算机进行工作。与此同时，在另一些大学和研究中心也建立了分时系统，随后商用分时系统开始服务。它像公用事业向用户输送电力、煤气一样，提供给用户计算能力，供科学、工程技术、教育、商业等各方面应用。

第五章 20世纪70年代与80年代初电子计算机的发展

5.1 第四代计算机

进入20世纪70年代以后，半导体集成电路得到了飞速发展，首先是半导体存储器问世，它不仅迅速取代了磁心存储器，而且向高密度、大容量方向发展，MOS存储器芯片集成度每三年大约翻两番，到1984年已达每片256K位，实验室已试制成1兆位，而价格却在不断下降，每年平均下降30%。大型机使用的ECL逻辑电路由20世纪70年代初的每片一二十门发展到了80年代初的1 000多个门。1981年，32位的微处理机已采用了超大规模集成电路，其集成度大多在每片10万个晶体管以上，有的已达每片45万个晶体管。在这一时期计算机技术发展的特点之一就是无论大型机、中型机、小型机，还是微处理机都采用这种高性能、高集成度的大规模和超大规模集成电路，这就构成了第四代计算机。

在这一时期，外围设备也向高性能、多品种、小型化方向发展，磁盘存储器进展迅速，存储容量平均每年增加25%，价格每年下降20%。1970年制成的IBM 3330型磁盘存储器容量为1亿字节，1981年问世的IBM 3380型磁盘存储器系统容量达25.2亿字节。与此同时，密度高、体积小、价格低的盒式磁盘与软盘也在迅速推广，各种各样的终端蓬勃发展，具有图形功能的高清晰度的彩色显示器也被广泛采用。

在软件方面也出现了不少成果，研制成了PASCAL、ADA、C、FORTH、LOGO、PROLOG等多种多样的高级语言。操作系

统、数据库管理系统、网络软件方面也有较大进展，尤其是UNIX系统，到1983年已有5 000多个投入运行。

随着第四代计算机中微型机和小型机的广泛普及，加上联机系统和计算机网络的展开，计算机应用的广度和深度在这一时期都有了很大的发展。

5.2　通用计算机的渐进发展

IBM 360是IBM公司在20世纪60年代开发的而且是使用最广的通用计算机。在开发360软件上耗费了巨大的人力和财力，仅360操作系统就耗费了4 000人年，而IBM用户在应用程序、培训及其他与应用有关方面的业务上也耗费了2 000亿美元。对这样丰富的软件资源，IBM公司决定不予放弃。于是在制定发展370系统方案的一个重要出发点就是与360系统程序兼容，也就是IBM 370系统在结构上是在IBM系统上的改进和发展，实际上也就是以前提出的继承方针。

1970年7月IBM公司宣布了IBM 370/145、IBM 370/155、IBM 370/165计划，次年又宣布了IBM 370/135计划。这些早期的IBM 370系统型号不久就为新的370型号所代替。IBM公司从1972年至1976年陆续发表了IBM 370/115、IBM 370/125、IBM 370/138、IBM 370/148、IBM 370/158、IBM 370/168、IBM 370/158-3、IBM 370/168-3等型号，从而形成了一个从小到大、紧密衔接、不断改进、逐步完善的通用计算机系列。IBM 370系统持续时间长达10年左右，在许多国家得到广泛应用。

为了实现与IBM 360系统兼容又发展新的功能，IBM 370系统采用两种控制方式，即基本控制方式和扩展控制方式。在基本方式下运行时，IBM 370系统等于IBM 360系统的功能结构，在IBM 360系统上开发的应用程序与操作系统仍可以在IBM 370

机器上运行，基本上不需修正；在扩展方式下运行时，IBM 370 系统新加的功能才能被使用。IBM 公司在 20 世纪 70 年代末 80 年代初出台的 IBM 4300 系列继续采取了这种兼容方针。

为了与 IBM 360 系统兼容，IBM 370 系统在结构上没有做根本上改变，但做了一些重要的改进，采用了一系列新技术：

（1）全面采用新电路工艺，如使用单片逻辑集成电路代替 IBM 360 系统使用的混合逻辑集成电路，采用 MOS 存储器代替磁心存储器，并且在一些中高档机里采用高速缓冲存储器。另外，提高了辅助存储器和输入输出设备性能，如以 IBM 3330 型磁盘（容量为 100 兆字节）代替了 IBM 2314 型磁盘（容量为 29 兆字节）。

（2）改进系统结构，如引入虚拟存储器，增加了多处理机功能，加强了数据通信和数据库能力以及软硬件的维护和调试能力，发展了一整套提高可靠性、可用性、可维护性的技术。

（3）推出虚拟存储器操作系统，支持虚拟存储、交互处理的应用环境。

（4）采用虚拟存储器和半导体 MOS 存储器作为主存是 IBM 370 系列的主要特点，也是计算机发展史上的一个里程碑。因为从 20 世纪 50 年代中期起至 60 年代末计算机一直采用磁心存储器作为主存储器，IBM 360 系统也是这样，而 IBM 370 系统作为通用机却首先采用了 MOS 大规模集成电路作为主存储器，开拓了新思路。虚拟存储器可使用户在编程序时不受主存储器容量的限制，从而大大方便了计算机的使用，提高了解题效率。

IBM 370 的系统性能大大超过了 IBM 360 的系统性能，如 IBM 370/165的性能是 IBM 360/65 的 2～5 倍。IBM 360/65 平均运算速度每秒五六十万次，主存储器的最大容量为 100 万字节，而 IBM 370/165平均运算速度每秒 200 万次，主存储器的最大容量

为 300 万字节。IBM 370/165 型经改进发展成 IBM 370/168 型，性能提高 20%，后来又改进成为 IBM 370/168-3 型，性能又提高了近 10%。为了保持 IBM 370 系统的市场优势，IBM 公司曾在 1971 年、1975 年、1977 年三次对其产品大幅度降价。

继 IBM 370 系统之后，IBM 公司于 1977 年 3 月出台了大型通用机 3033，它是在 370 系统基础上加以改进的，如扩充主存储器和高速缓冲存储器的容量、缩短机器运转周期、加强流水线控制，从而提高了性能。IBM 3033 与 IBM 370/168-3 相比，处理能力提高了 80%，而价格则大致相当。同年秋天，IBM 公司又出台了 IBM 3031（相当于 IBM 370/158）和 IBM 3032（相当于 IBM 370/168），形成了 IBM 303X 大型通用机系列，它们是 IBM 370 系统的延续，与 IBM 370 系统兼容，但具有更高的科学计算处理能力。

1979 年 1 月，IBM 公司又出台了 4300 系列，并在同年向用户提供了 IBM 4331 及 IBM 4341 两个机种，用来代替 IBM 370 系统中的低档机器。IBM 4300 机系统结构并无重大改变，与 IBM 370 系统可以兼容，但由于采用了每片 64K 位的存储电路和每片 704 个门的逻辑电路，其性能比 IBM 370 系统相应的型号提高两三倍，价格反而下降 20%。

与 IBM 4300 相伴随的是 1980 年出台的高档大型机 IBM 3081D，它采用了每片 704 个门的高速大规模集成电路，并且采用了称为热传导模块（TCM）的新颖组装技术，大大提高了组装密度，在半块砖大小（$9\times9cm^2$）的 33 层陶瓷模块里容纳了 45 000 个门电路，这相当于 20 世纪 70 年代初期中型通用机 IBM 370/145全机的门电路数目。采用了这种大规模集成电路和高密度组装技术，再加上采用双处理机结构，IBM 3081D 运算速度提高到了每秒 1 000 万次，而且显著地缩小了体积，减少了功耗与发热

量。IBM 3081D 与 IBM 3033 相比，安装面积缩小 21%，功耗减少约 66%，发热量减少 70%，售价反而降低，大大改善了机器的性能价格比。1981 年 10 月出台了 IBM 3081K，运算速度比 IBM 3081D 提高百分之三四十；1982 年 9 月又推出了 3084K，主存储器最大容量扩充到 64 兆字节，运算速度提高到每秒 2 500 万次。20 世纪 70 年代初高档大型通用机为每秒一二百万次，到 80 年代初提高到每秒一二千万次（见表 3.5-1），这是重大的进展。

表 3.5-1 IBM 公司 20 世纪 70 年代以来高档大型通用机水平

机型	370/165	370/168	370/168-3	3033	3081D
发表日期	1970 年 6 月	1972 年 8 月	1975 年 3 月	1977 年 3 月	1980 年 11 月
出售日期	1971 年 4 月	1973 年 6 月	1975 年底	1978 年 4 月	1981 年 第四季度
售价（日元）	20 亿 （1MB 系统）	14.5 亿 （1MB 系统）	10 亿 （4MB 系统）	9.8 亿 （4MB 系统）	9 亿 （16MB 系统）
运算速度	200 万次/秒	230 万次/秒	260 万次/秒	500 万次/秒	1020 万次/秒
机器周期	80ns	80ns	80ns	57ns	26ns
电路工艺技术	MST 单片系统工艺	MST 单片系统工艺	MST 单片系统工艺	AMST 改进的单片系统工艺	TCM 热传导模块
门数/芯片	2—16	2—16	2—16	12—44	704
门数/模块	2—16	2—16	2—16	12—44	45 000
高速缓存容量	8—16KB	8—16KB	32KB	64KB	32KB×2
主存容量	512—3MB	1—8MB	1—8MB	4—16MB	16—32MB

通用计算机发展的渐进方针不单是 IBM 公司的策略，其他公司以及其他国家也采取了同样的策略，如 CDC 公司的 Cyber 7000 系列、Cyber 70 系列以及 Cyber 170 系列，虽几度更换系列名目，所采用的器件也有很大变化，但其系统结构却始终继承着 1964 年出台的 CDC 6600 系列，基本未变，只是局部地做了一些改进。其他如尤尼瓦克公司、宝来公司等也是如此。

与通用机渐进发展密切相关的问题是与IBM计算机兼容。在20世纪70年代，不少计算机厂家纷纷走上与IBM计算机兼容的道路，这就是所谓PCM的兴起。PCM原是Plug Compatible Manufactures（接插兼容制造商）的缩写，起初是指那些可以生产IBM外围设备的替换品的厂商，如ISS、STC、Memorex等，后来转而着重在主机方面，称之为Plug Compatible Mainframe（指兼容主机）或Program Compatible Mainframe（程序兼容主机）。制造与IBM兼容型的计算机，一般是按照IBM系列机的系统结构制造主机，并直接引用IBM计算机丰富的软件资源。由于只造硬件和往往采用更快的器件使产品的性能价格比胜过IBM系列的同类机，从而便与IBM公司争夺国际计算机市场。兼容型计算机的开拓者是阿姆达尔，他所创办与领导的阿姆达尔公司的兴起与发展是具有代表性的。除阿姆达尔公司大力发展与IBM系列兼容的计算机跟IBM公司进行激烈的市场竞争外，在美国还有NAS公司、CDC公司、DEC公司、王安公司、宝来公司和NCR公司、尤尼瓦克公司与霍尼威尔公司等一系列公司都发展与IBM兼容型计算机并保持自身公司的特色和IBM公司抢夺市场。在国际上，日本、德国一些计算机公司也先后走上了与IBM产品兼容的道路。原苏联与东欧国家研制的EC-1、EC-2系列也是仿IBM 360、IBM 370系统的产物。

5.3　巨型计算机的出现

由于现代科学技术和国防尖端技术的发展，核武器设计、反导弹武器系统、空间技术、空气动力学、大范围天气预报、石油勘探等领域都对计算机提出了更高的要求，要求计算机有很高的速度、很大的容量，这对于当时的大型通用机远远满足不了要求；另一方面，集成电路的进展为制造巨型计算机提供了必要的物质

基础，否则，一个有几百万个元器件的巨型机，其体积、散热和可靠性等都是技术上的大难题。

美国伊利诺斯大学青年教授丹尼尔·L·斯罗特尼克(Deniel L. Slotnick)在20世纪60年代中期就打算研制一种世界上最快的计算机，试图将运算速度提高两三个数量级。他提出了一个继承和发展1962年西屋电器公司设计的Solomon计算机的方案：突破传统的串行计算机系统结构，采用256个处理机同时运算的阵列式并行计算机系统。预计该系统最高运算速度可达每秒10亿次，这个速度比当时美国最快的计算机运算速度每秒200多万次多2～3个数量级。1965年，美国国防部高级研究计划局审查了这个方案，并批准拨款研制。于是这个取名为ILLIAC-Ⅳ的巨型机研制工作正式开始，由伊利诺斯大学负责研究设计，由宝来公司承包制造，一些半导体大厂家研制生产所需要的集成电路。

ILLIAC-Ⅳ是单指令流-多数据流系统，处理机阵列分成4个象限，每个象限有64台处理机，组成一个8×8阵列，由一个公共控制器进行控制，整个系统由一台B 6700计算机进行管理，原计划于1969年完成。但在研制中技术上碰到了很多困难，指标和技术途径一再修改，交机时间一再拖延。逻辑电路原拟用20个门/片的中规模高速集成电路，后因技术上不成熟而改用每片7个门的小规模集成电路；15层印刷电路板过不了关；拟作为主存用的磁膜存储器研制结果不合要求，只好再试制双极型半导体存储器；机器主频从25兆赫降到13兆赫。研制经费也大大超过预算：原预算制造256个处理机的系统为1 400万美元，后来缩小规模为64个处理机的系统，实际造价已达3 000万美元。1973年，ILLIAC-Ⅳ交付美国航天局，使用后很长时间内工作不稳定。1975年进行了10个月的停机大检查，从逻辑设计到工艺制造，找出和消除了几千个故障与隐患，11万个端接电阻全部被换掉。

ILLIAC-Ⅳ投入运行后，仍存在不少问题，如使用效率不高、存储容量小，这使解题能力大受影响，运算速度也没达到预定指标，最高仅达1.5亿次。尽管如此，它在推动并行计算机的研究工作上，还是为以后的研究工作提供了宝贵的经验教训，同时还促进了新技术，尤其是半导体存储器和高速逻辑集成电路的发展。

在这一时期，美国研制成的巨型机还有：CDC公司的Star 100、德克萨斯仪器公司的ASC、古德依尔宇航公司的Staran、美国系统发展公司的Pepe系统等。但是，在20世纪70年代巨型机领域取得的最高成就还是Cray-1（克雷-1）计算机。Cray-1的设计者是著名的计算机设计者西蒙·克雷博士，开始研制时间是1972年。

Cray-1巨型机于1976年完成，它在计算机系统结构方面具有独创性，由于克雷考虑到在天气预报、飞行器设计和很多核物理研究中存在着大量向量运算的特点，因而在设计时将向量计算组织得相当完善。主机具有12个功能部件，可以同时进行加法、乘法等不同操作，而每个功能部件又都以流水线方式快速处理。向量运算达每秒8 000万次。同时，Cray-1也兼顾了一般的标量运算，使标量运算速度为CDC 7600的2倍 。

Cray-1功能很强，但并不繁杂，它只具有适合科学计算的有限指令，其指令简单明了、易于掌握。中央处理机的绝大部分(95%)只用了一种集成电路芯片。电源、降温设备都很简单普通。但它在科学计算方面的解题能力相当于40台IBM 370/168大型通用机，而售价却与后者差不多，为500～800万美元。所以Cray-1受到许多重要研究单位和军事部门的欢迎。

克雷公司在Cray-1巨型机取得成功之后，接着在1973年推出了Cray-1的改进型Cray-1S，把主存容量从100万字增加到400万字（字长64位加8位校验位），增强了输入输出能力。1983

年又制成了CrayX-MP，向量运算可达每秒4亿次。到1984年，克雷公司一共销售了88台巨型机，占全世界巨型机装机总数的70%。与此同时，CDC公司在Star-100的基础上先后制成了Cyber-203和Cyber-205，采用大规模集成逻辑电路，以半导体存储器代替磁心存储器，增大了指令缓冲站容量，采用了新的标量处理部件。Cyber-205比Cyber-203具有更强的功能，每次可做浮点运算4亿次。这些是20世纪70年代末和80年代初开始生产的水平最高的巨型机。

随着科学技术、国民经济以及军事上的发展需要，许多计算机研究机构都开展了性能更高的巨型机的研制工作。克雷研究公司提出研制Cray-2和Cray-3系统的计划，Cray-2每秒执行8亿次浮点运算，Cray-3采用砷化镓器件，运算速度比Cray-2快5～10倍。美国航天局于1977年2月与宝来公司和CDC公司签订了合同，研制每秒10亿次的巨型机NAS (Numerical Aerodynamic Simulator)，主要用于空气动力学数值模拟计算，代替一部分风洞的早期试验，以减少试验次数，克服试验的局限性。美国兰德公司提出了研制10 000台微型机（100×100阵列）组成的系统，每秒可执行20亿次乘法操作，适于流体动力学计算和气象数值模拟等的应用。古德依尔宇航公司研制的大型阵列机MPP，由16 384个处理机组成128×128的方阵，它是供国家航天局哥达德航天中心用于对卫星图象进行超高速处理的。日本也从1983年迈进了巨型机领域，相继宣布了S810、Facom、VP·SX系列。此外，英国、原苏联、法国也先后开始研制巨型机，出现了在世界范围内竞相建造巨型机的景象，尤其是美国和日本研制成功的多种巨型机（见表3.5-2），在这一领域它们相互间开展了激烈的竞争。

表 3.5-2 美国和日本研制生产的一些巨型机

国别	型号	研制单位	研制时间	运算速度（浮点运算次数/秒）	主存容量（万字）	使用单位或用途
美国	Cray-1S	克雷研究公司	—1978	0.8 亿次	50～400	核武器研制、石油勘探等
	Cray-MP	克雷研究公司	—1983	4 亿次	200～400	
	Cray-2	克雷研究公司	—1985	8 亿次	400～3200	
	CYBER-203	控制数据公司	1975～1979	0.5 亿次(64 位) 1 亿次(32 位)	50～200	宇航局、凯特兰空军基地、舰队海洋中心
	CYBER-205	控制数据公司	—1981	4 亿次(64 位) 8 亿次(32 位)	—400	核武器研制、飞行器设计、气象预报、石油勘探
	NAS	宝来公司 控制数据公司	1977～1986	10 亿次以上	3000 以上	
	MPP	古德依尔宇航公司	—1982	60 亿次(8 位整数加) 1.6 亿次(32 位浮点加)		用作卫星图象处理
日本	FACOM VP-200	富士通公司	—1983	5 亿次	800～3200	
	FACOM VP-100			2.5 亿次	800～1600	
	S810/20	日立公司	—1983	6.3 亿次	400～3200	
	S810/10			3.15 亿次		
	SX-2	日本电气公司	—1984	13 亿次(32 位)	—3200	
	SX-1			5.7 亿次(32 位)		

5.4 小型计算机迅猛发展

20世纪60年代中期，出现了一种字长较短、工作可靠、价格便宜、使用方便的新式小型计算机（minicomputer）。美国数字设备公司（DEC）制成的12位计算机PDP-8，被认为是第一台这样的小型机。它采用集成电路，体积较小，售价仅25 000美元，在用户当中引起强烈反响。进入20世纪70年代后，随着科技、生产发展的需要，小型机发展很快，美国一路领先，日本、西欧、原苏联等国也大力发展，形成了世界范围的“小型机热”。到1976年，世界上主要资本主义国家生产小型机的厂家已超过85个，生产产品有300多种，其中美国就占有60家左右，生产近250种产品。在20世纪70年代，小型机产量猛增，美国小型机年销售量由1965年的1 000台增至1975年的71 000台，到1980年竟达156 000台，从而展开了一个计算机推广普及的浪潮。

售价便宜是小型机得以迅速推广的首要条件。小型机字长短（大多为16位）、机器规模小、设计试制周期短、便于及时采用先进工艺、生产量大、硬件成本低；小型机软件比大型机软件简单，而且软件的研制费用分摊到大批的小型机产品上，所以软件成本也低。随着半导体集成电路的迅速发展，小型机售价逐年下降20%。存储容量为4 000字节的小型机主机1965年售价为625 000美元，1970年为8 000美元，1974年下降到2 350美元。一个容量不大的小型机配上所需的外围设备，价格一般为几万美元。

小型机体积娇小、结构简单、易于操作、便于维护。小型机往往把处理器、存储器、连用磁盘机以及电源都装在一个机柜里，其结构简单，使得管理和维修比较方便。使用环境无特殊要求，不需要专用空调设备，程序编制也比较简便，用户使用机器不必经过长期的专门训练，这就使小型机非常便于推广。

可靠性高是小型机的一个突出优点，由于结构简化、使用元件数量减少、率先采用高集成度的半导体器件和新的装配工艺，故障率大大降低，加上采用错误检查及纠正技术，平均无故障运行时间可达 4 000 小时到上万小时，如军用 PDP 11/34 小型机，平均无故障运行时间高达 24 837 小时。不少装机单位对小型机实行无人管理。

由于小型机所具有的这些特点，从而大大扩大了计算的应用范围，加快了计算机推广普及的进程。在 20 世纪 70 年代，小型机在生产过程控制方面应用越来越广，遍及石油、化工、电力、冶金、机械、造纸、水泥等工业部门，取得了显著的经济发展。

许多大型分析机器、测量仪器（如质谱仪、光谱仪、波谱仪、核磁共振仪等）以及工业装置也越来越多地采用小型机进行数据收集、整理、分析、计算和自动控制，以提高系统自动化程度、提高效率、提高精度、使其方便实用。

小型机在数据处理领域发挥了很大的作用，并且也深入到了企业、商店、金融部门进行生产管理、订货管理、销售分析、经济核算、工程管理以及各种财会统计等。

小型机也普遍为研究所、大学、医院的实验室、医疗室所采用。一般用于科学计算、数据收集和测量分析等工作，成为科研、设计与医疗工作的重要辅助工具。

小型机还广泛用于通信控制和外围设备控制。许多大型、巨型计算机系统还用小型机来作为辅助机，例如巨型机 ILLIAC-Ⅳ用一台小型机 PDP-11 承担整机的通信，用另一台负责系统资源的分配。

小型机的发展，大致可分为下列几个阶段：

1969 年以前是小型机问世初期，小型机字长不一，有 8 位、12 位、16 位等，没有形成系列。其主要代表为 PDP-8，主存容量为

4 096 字，指令执行周期为 3 微秒。

1969 年到 1976 年这段时间是 16 位小型机系列开发、推广应用的时期。这个时期小型机的发展开始走向成熟、形成系列，并迅速占领市场，几乎应用到一切可能应用的领域，主要的系列有 PDP-11、NOVA、H-P3000 等。DEC 公司的 PDP-11 是一个 16 位小型机系列，它的性能价格比较之 PDP-8 好得多，所以需求旺盛，到 20 世纪 80 年代初已销售了 25 万台。PDP-11 系列设计思想的最大特点是使用单总线结构。这种结构非常灵活，有良好的可扩充性，不仅外围部分可以任意选配，甚至连主机的存储器品种和数量都可在很大范围内选配，并便于实现多机连接和连成网络。PDP-11 系列软件较为齐全，而且简单易用，它有多种操作系统，既有面向单用户的小型操作系统，也有面向多用户的分时操作系统，这是吸引用户的又一长处。以 PDP-11/20 为开端的小型机系列，沿着提高功能、降低价格的方向不断发展，不断更新换代，极富有生命力。在一些中高档新机种里，逐步采用了大中型计算机中一些行之有效的技术。1972 年问世的 PDP-11/45，主存容量扩充到 128 千字节，从而突破了以往小型机 64 千字节的限制，采用虚拟地址，改善了存储管理与保护方法，增加了浮点处理器。1975 年制成的 PDP-11/70，主存容量扩充到 1 兆字节，并有容量为 2 千字节的高速缓冲存储器，为了适应机器功能发展的需要，单总线结构后来发展为多总线结构。PDP-11/70 采用多种高级语言，能同时进行实时、分时和批处理。PDP-11 经过多年发展，形成了一个覆盖面相当宽的小型机系列，各种机器扩充容易、软件兼容，积累了非常丰富的软件资源，从而成为应用最广的小型机系列。

1976 年以后是 32 位高档小型机兴起的时期。20 世纪 70 年代中期 16 位小型机向前发展似乎已达极限，其系统结构已不能与迅速提高处理能力的需求相适应。于是，32 位高档小型机脱颖而出，

不久之后蓬勃兴起，最为典型的机器有PE 3200系列、VAX-11系列、Prime 50系列、Eclipse MV系列等，以VAX-11系列的销售量为最大。DEC公司的VAX-11高档小型机系列于1978年开始生产，首先推出的是VAX-11/780，接着又相继推出750、730、782，这是一个多用户、多语言、多道程序的交互式计算机系列。它与PDP-11兼容，但性能高、功能强，主存容量扩大到2兆字节，逻辑地址空间达4 300兆字节。VAX-11/780浮点运算器执行64位浮点运算只需1.4微秒，输入输出传输率达到13兆字节/秒。VAX-11系列广泛采用RAS技术（即可靠性、可用性和可维护性技术），并具有遥控诊断性功能，维护工程师可在外地通过远程终端对机器做检查诊断，软件也较齐全，有两套操作系统，一套是VMS，另一套是UNIX的VAX-11版本。高档小型机速度快、精度高，广泛应用于科学计算，如实验室计算、计算机辅助设计与制造（CAD/CAM）、图象处理、地震信号处理等，在实时处理、一般事务处理方面的应用也在不断增加。

美国的小型计算机制造厂家很多，主要厂家有DEC、DGC（通用数据公司）、HP（惠普公司）、王安公司等，领先的是DEC公司。1957年，曾参加过旋风计算机研制的麻省理工学院工程师肯尼斯·奥尔森（Kenneth H. Olsen），筹资7万美元，建立了这家公司，由于经营得法，公司迅速发展，在美国经济不断发生萧条的情况下，DEC公司在20世纪70年代销售额以平均年增36%的高速度飞快增长。1977年DEC公司营业额突破10亿美元，到1981年年收入达32亿美元，在美国计算机企业中跃居第二位，仅次于IBM公司，但它在小型机行业中独占首位，占有世界市场的38%。

5.5 微型计算机的普及

1946 年推出的 ENIAC 被认为是第一次计算机革命的开端，这台机器占地 170 平方米，用了 18 000 支真空管，重达 30 吨，功耗 140 千瓦。20 世纪 70 年代微型机的诞生则被人称之为计算机第二次革命，该机全套电路集中在一片或几片几十毫米大小的硅晶体上，一台完整的微型计算机系统只有打字机那么大，功耗只有几瓦，而速度比 ENIAC 快几十倍。微型机的出现和发展，推动了计算机的大普及，成为 20 世纪 70 年代的最重大事件。

微型机最早的开发者是美国英特尔公司的年轻工程师霍夫 (Macian E. Hoff)，1969 年他接受日本一家公司的委托，设计台式计算器系列所用的整套电路。霍夫仔细研究了日方提出的方案，发现该方案需使用许多昂贵的电路芯片，于是他根本改变了日方的设计，提出了一个大胆的设想：采用可编程序通用计算机的思想，把计算器的全部电路做在四个片子上，即中央处理器片、随机存取存储器片、只读存储器片以及寄存器电路片。公司的另一名年轻工程师意大利人费金 (Federico Fagin) 从事电路设计，他在 4.2 ×3.2 毫米的硅片上集成了 2 250 个晶体管，首次成功地用一个芯片实现了中央处理器的功能，这就是 4 位微处理器 Intel 4004。它再加上一片 320 位的随机存取存储器、一片 256 字节的只读存储器和一片 10 位寄存器，通过总线连接就组成了 4 位微型电子计算机 MCS-4。这是世界上第一台微型机，1971 年制成，从此开始了微机的发展过程。

继 4 位微处理器 Intel 4094 之后，英特尔公司于 1972 年初完成最早的 8 位微处理器 Intel 8008，改变了按台式机要求的设计，而在 13.8 平方毫米的芯片上做出了能执行 45 种指令的处理器。这些早期产品主要采用工艺简单、速度较低的 P 沟道 MOS 电路，

人们称之为第一代微处理器。

1973 年出现了采用速度较快的 n 沟道 MOS 技术的 8 位微处理器，人们称之为第二代微处理器。一些有名的产品如 Intel 8080、M 6800、Z 80 均属这一代。Intel 8080 最先出台，它与 Inte l8008 有同样的基本指令集，性能却提高十倍。摩托罗拉公司 1975 年研制成功 M 6800，它不像 Intel 8080 用三种电源，而是用一种，采用小型机 PDP-11 的总线结构，而且有完备的配套元件。1976 年齐洛格公司又推出了性能比 Intel 8080 好的 Z 80。以这些微处理器为核心的微型机的功能显著增强，微型机的外围设备也相应发展起来。自此以后，微机的发展开始进入兴盛时期。

1978 年起出现了 16 位微处理器，它标志着微处理器开始进入第三代。最初开发成功的是英特尔公司的 Intel 8086，在 32.9 平方毫米芯片上集成了 2.9 万个晶体管，性能又为 Intel 8080 的 10 倍，它采用了硅栅 H-MOS 工艺。此后 16 位微处理器相继出现，如齐洛格公司的 Z 8000 和摩托罗拉公司的 M 68000 等，以这些微处理器为核心的微型机系统具有很大的寻址能力、较宽的数据通道、各种数据类型，有支持多处理机系统及分布式处理机系统的硬、软件，能够执行数据处理、科学计算等各类应用程序，其性能可与过去中档小型机相抗衡。例如，齐洛格的 Z 8000，在许多情况下其运算速度超过了数字设备公司的中档小型机 PDP-11/45。

1981 年起采用超大规模集成电路的 32 位微处理器开始问世，如英特尔公司的 IAPX 432、I 80386，贝尔实验室的 MAC-32 以及 HP-32、NS-16032、Z 80000 等，这就是第四代微处理器，它们的集成度大多在 10 万个晶体管以上，而 HP-32 在单片上集成了 45 万个晶体管。上述 32 位微处理器大多采用流水线方式和微程序技术，都拥有巨大的地址空间，并能支持虚拟存储，较好地面向高级语言，可以构成与 20 世纪 70 年代大中型计算机相匹敌

的微型机系统，如 I 80386 多处理器系统性能与大型机 IBM 370/158相当。有关微型机换代情况见表 3.5-3。

表 3.5-3 微处理器更新换代情况

代	年份	工艺	字长（位）	引线（条）	指令周期（ms）	时钟（MHz）	集成度（器件/片）	典型产品
1	1971～1973	PMOS	4 8	16 18	20	0.7～0.8	2 000	I 4004、I 8008
2	1973～1977	NMOS	8	40～64	2	2～5	5 000～ 10 000	I 8080、M 6800 Z 80、I 8085
3	1978～1980	HMOS	16		0.5	5～10	30 000	I 8086、Z 8000 M 68000
4	1981～	NMOS HMOS CMOS	32		0.3	8～18	10～50 万	IAP×432、 HP-32、 MAC-32、 NS 16032、 I 80386、Z 80000

在 20 世纪 70 年代，微型机是以硬件技术为中心发展的。它的几代的变化，都是以集成电路技术的提高为基础的。与微型机的硬件相比，其软件发展较为缓慢。早期的微型机功能较弱，软件也比较简单，随着微型机性能的提高，对软件的需求也日趋迫切，如果没有丰富的软件支持，硬件功能就不能充分发挥出来。从 20 世纪 70 年代中期起，对开发微型软件逐渐得到重视，并取得了一定的进展，8 位与 16 位微型机不仅广泛使用了汇编语言，而且还设计和移植了多种高级语言，如 BASIC、PASCAL、FORTH、C 和 LOGO 语言等。微型机操作系统也取得了一定进展，基尔达尔（Cary Kildal）发明的 CP/M 操作系统具有最广泛的微型机用户基础，拥有 3 000 多种支持软件。CP/M 的各种版本可以在多种 8 位、16 位微型机上使用。Microsoft Corp 所研制的 MS-DOS 操作系统在 16 位微型机上应用非常广泛。著名的 UNIX 操作系统也被移植到了 16 位微型机上使用。

为了适应于不同使用的需要，微型机厂家开发和生产了多种多样的微型机：单片机、多片机、单板机、多板机、专用机、通用机等。在这些大家族中，单片机占有重要的地位。通常，微型计算机是由按功能划分而制造的一组集成电路组成的，而单片微型计算机则由一个集成电路片子构成，即中央处理器、随机存取存储器、只读存储器、输入输出接口都被集成在一个片子上，它一般作为控制电路被用于产品中。这种单片机设计制造简单、使用方便、体积小巧、功耗低，尤其是价格极为低廉，在大批量生产时，单台的价格可低至1～2美元的程度，所以单片机自1975年推出以后发展极快。4位单片机广泛用于各种家用电器、电子玩具、袖珍计算器、记帐机、电子秤等。8位单片机大量用于工业控制、汽车、仪器仪表以及外围设备控制器等。

20世纪70年代后期，一种作为独立的微型机系统——个人计算机受到欢迎。最早的个人计算机是美国Apple公司的Apple Ⅱ型计算机，于1977年开始在市场上出售，继之出现了美国Radio Shack公司的TRS-80和Commodore公司的PET-2001。这三种有代表性的机种对个人计算机的初期发展做出了重要贡献。此后，各种型号的个人计算机纷纷出台。个人计算机一般以8位或16位微处理器芯片为基础，存储容量为64K字节以上，具有键盘、显示等输入输出设备，并可配备小型打印机、软盘、盒式磁盘等外围设备，可以使用BASIC、COBOL、PASCAL等高级语言，用户可以自编程序。个人计算机价格便宜，低档的仅几百美元，主要供家庭娱乐和业余爱好者使用，高档的也只有1 000多美元，用于经营管理、科学计算以及教育等领域。

随着个人计算机的用途日益广泛，IBM公司于1981年推出了IBM PC，接着1983年又推出了IBM PC/XT（是前者的扩充型），由于IBM个人计算机具有设计先进、软件丰富、功能齐全和

价格便宜等特点，从而迅速地占领了市场。到1983年，IBM公司个人计算机销售量已居世界第一，取代了号称美国微型机之王的Apple公司。1983年9月IBM公司又推出个人计算机新品种PCJR，一个主存容量为64K字节的基本配置售价为699美元，仅及IBM PC的1/3。主存容量扩充到128K字节，加上软盘驱动器，其售价也只有1 269美元。

进入20世纪80年代，个人计算机急剧增长，据统计，1980年美国出售个人计算机72.4万台，1981年销售量几乎翻了一番，达140万台，1982年又翻了一番，出售了280万台，价值约50亿美元，其发展之迅猛超过了以往任何类型的计算机。

微型机用途极为广泛，渗入到了社会生活的各个方面：单片微型机被广泛用在仪器仪表中，使仪器仪表出现智能化；在工业控制方面的应用，大大促进了自动化技术的普及；在农业生产方面，也利用微机自动管理温室的环境、自动喷洒农药、分析和供给牲畜饲料、记录和提供气象情报等；在企业管理应用方面也日趋普及，大大地促进了管理工作现代化；微型机还进入了家庭，大大地改变了人们的生活方式，微型机广泛用于控制家用电器，如微波炉、空调机、洗衣机、电冰箱、多媒体等，此外还用于家庭生活管理和家务信息处理等。

5.6 联机系统和计算机联网的蓬勃发展

20世纪50年代已经出现了联机系统，60年代中期开始兴起，到70年代计算机技术与通信技术进一步密切结合而导致了联机系统和计算机联网的蓬勃发展。

以日本为例，1971年有308个联机系统，到1980年增加到5 879个，10年里增加了近20倍（见表3.5-4），联机系统使用的计算机占装机总数的比重由1972年的3.9%增加到1980年的

10.3%。而在美国，20世纪70年代中期就有30%的计算机连成网络，到70年代末更为普遍。联机系统随着使用范围的不断扩大，数量也在不断增加，对国计民生的影响和作用也越来越大。

表 3.5-4　日本联机系统进展情况

项目 \ 年度	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
系统数	308	468	744	1 168	1 479	2 057	2 749	3 468	4 668	5 879
与上年度相比增加数	113	160	276	424	311	578	692	719	1 200	1 211
与上年度相比增长率（%）	58	52	59	57	27	39	34	26	35	26

日本银行业务已计算机化、联机化。日本88家银行（约有7 000多分行和营业所）全都建立了联机系统，如三菱银行东京总行与大阪分行的业务中心通过通信电路和全国184个支行、营业所的出纳终端连接构成的联机系统，可以处理国内汇款、存款的全部业务，东京的存款可以在大阪分行和其他各地营业所取款，日本南北相距几百海里的分行和营业所之间汇款可以在三秒钟内支付。日本国营铁路MARS 105客票预约自动化系统是一个庞大的联机系统，由6台大型计算机和分布在各售票处的1 700多个终端构成，每天办理1 500列特快、快车的100万张客票预约业务，预约期限为2个月，每天办理预约团体客票60万张，预约期限为6个月。

美国、日本和西欧还建立了各种数据库系统，通过终端可以随时检索所需要的资料。美国图书馆建立的MEDLARS医学分析与检索系统，储存了1965年以来70个国家用41种文字发表的3 000多种医学杂志上的文献。除美国各个医学中心与图书馆能够通过终端同MEDLARS直接联系之外，澳大利亚、加拿大、英国、法国、德国、意大利、日本、墨西哥、南非、瑞典的医疗卫生机构以及设在巴西圣保罗的泛美卫生组织都与这个系统连结着。它

的效率十分惊人，平均只用10分钟就可以检索9万篇论文。

设在卢森堡的欧洲共同体计算中心装有4台大型计算机和100多盒大容量磁盘，各地400多个终端与此中心相连，可以随时查询欧洲共同体10个成员国的贸易数据与有关资料。

到20世纪80年代初，美国已有1 000多个电脑资料中心，有的提供一般信息，如：商品价格、股票行情、班机时刻表以及电影书刊评论；有的提供比较专门的信息，如：有关经济的统计、专门性技术资料、医疗病例处方、有关的法律文件案例等。用户只要在终端机上操作，接通电脑资料中心，就可以在荧光屏上显示出所要的信息。

面向终端的网络仅局限于终端和计算机之间的通信，在这个基础上又发展了能够实现计算机与计算机通信、共享网络内各种资源的计算机联网。经过20世纪60年代的研究试验阶段以后，计算机联网在70年代迅速发展起来，网络的覆盖面积不断扩大，已成为信息社会的技术支柱，显示出强大的生命力。

美国ARPA联网的诞生是计算机联网发展的里程碑。1968年美国国防部高级研究计划局(ARPA)提出了ARPA联网计划，设想将ARPA所属的许多研究中心的计算机和终端通过高速通信电路互相连接起来，达到网络资源（包括硬件、软件和数据资源）共享的目的。1969年下半年建网工作正式开始，当时用4台计算机互连进行试验。1971年2月发展成为连接15个中心的网络，至此ARPA联网初步建成，以后不断扩大，1973年发展到有34个节点，1975年达到60个节点以上，连接的主计算机超过100台，网络地理范围横跨全美，并且展延至欧洲。ARPA联网所具有的特点——资源共享、分布式构形、分组交换方式、采用单独的通信控制处理机以及网络协议分层化——往往也被认为是计算机联网的一般特征。和联机系统相比，ARPA联网在技术上又上了

一个新的台阶。

在发展研究用 ARPA 联网的先后，一些大型商用计算机联网也陆续兴建，美国通用电气公司的多机种分布式 GE 联网于 1968 年投入运行，后来网络规模东至日本东京、大阪，西达欧洲，地理范围十分广阔，可以利用时差达到资源的充分利用。分时网络公司的商用计算机联网 Tymnet 也自 1970 年开始提供商用分时服务。CDC 公司的商用计算机联网 Cybernet 到 20 世纪 70 年代中期时已把纽约、华盛顿、旧金山等 7 个地区的计算机中心连结起来，以提高计算机可靠性、可用性，使负荷平衡，提高计算机使用率，充分利用各计算中心的程序库与数据库。网中有能力极强的大型和巨型计算机系统，早期连接的有每秒 300 万次的 CDC 6600，后来将每秒 3 700 万次的 Cyber 76 和每秒 5 000 万次的 Star 100 都接入该网。

继美国之后，欧洲、日本也相继建立了共享资源的计算机联网，如国际航空通信协会的 SITA 联网、德国的柏林联网 (Bernet)、法国的 Cyclades 网、欧洲原子能中心的 Cern 网、日本的东京大学计算中心网络等。与计算机联网发展相适应，不少国家对现有电话、电报网进行改造，以适应数据传输的基本要求，并且开发建立了新的公用数据通信网，以满足对数据通信质量和降低通信费用的要求。在公用数据网的发展建设中，分组交换网发展较普遍，因为分组交换技术能够充分利用通信网的资源，网络具有码型、速度、规程的转换能力和差错控制能力，能自动地进行路线选择和流量控制，不同的计算机和终端能够实现通信，因此越来越受到各国的重视。

随着计算机的广泛应用，特别是微型和小型计算机大量涌向社会，一个单位在一座大楼或一群建筑物内安装有多台计算机的现象日趋普遍。计算机网络技术既然能横跨大陆和海洋将世界范

围的计算机连接起来，自然也能穿过走廊和高楼将办公室、实验室的各类计算机互连起来，如果把前一类称为广域计算机联网，则后一类可称为局部区域计算机联网或简称为局部网 。

局部网的发展是与微型机飞快的发展和应用分不开的，局部网和微型机相结合以后才具有了强大的生命力，而微型机通过局部网获得了构造大系统的能力和扩大了应用范围。过去认为价格较贵、复杂的大型设备是不能配接到微型机系统上的，有了局部网后，多台价格低廉、性能较低的微型机可以共享某些昂贵的设备资源和信息资源，如大容量磁盘存储器和数据库、高档输出设备等，从而显著提高了性能。局部网还促进了办公室自动化的实现，使得在一个经营管理的场所，把草拟、传输、加工、储存和利用信息的全过程自动进行，从而大大地提高了工作效率。局部网的地理范围有限，通常网内的计算机限于安装在一个大楼或建筑群内，因而一般涉及的距离为几百米至几千米。局部网采用的信道频带较宽，其传输速率一般在几至几十兆比特/秒，而一般的远程传输速率则为几至几十千比特/秒。

这种属于一个单位所有的局部网结构灵活、连接方便、扩展容易、成本低廉，所以具有广阔的发展前景。据粗略估计，1983年生产局部网的厂家已超过200家，近百种产品，在局部网的商品中已发展了三类产品：第一类是低性能、低价格局部网，采用双纽线，数据速率较低，为1兆比特/秒或更低，如Omninet、Cluster/One、Model A等。第二类是中等性能、中等价格局部网，采用同轴电缆，基带传输数据速率为10兆比特/秒左右，如Ethernet和Ethernet类的Net/One、Z-net等。第三类是高性能、高价格局部网，采用同轴电缆或光导纤维、宽带传输可综合传输数据、话音、图形和图象，如Wangnet、Cablenet等。

如果说广域网的发展，使得计算机网的覆盖面积不断增大，那

么局部网的发展使得计算机网的覆盖密度更密。总之，由于计算机联网的蓬勃发展，大大地加快了社会信息化的进程。

5.7　计算机服务业的兴起

随着计算机制造业的发展，计算机服务业也相应地兴起。美国是计算机服务业建立最早、发展最快、规模最大的国家。计算机服务业有4种服务形式：处理服务、提供软件产品、专业服务及系统集成。处理服务即向用户提供计算机或访问计算机网络的手段，进行批处理服务、远程计算服务（如交互式、远程批处理、数据库信息检索、可视数据服务等）以及设备管理服务（为长期租赁计算机的用户维护机器）；软件产品服务是向用户或其他供应商出售系统软件或应用软件产品（软件包）；专业服务内容包括受托程序设计，即按用户特殊需要设计软件，在系统设计、软件设计等方面提供咨询等；系统集成主要是承包计算机系统工程，负责系统配置，将购入的硬件及各种设备配上专用的接口和必要的软件，集成为完整的应用系统提供给用户。

美国计算机服务业在20世纪60年代初具规模，70年代迅速发展，1970年营业额为30亿美元，到1980年增加到17 848亿美元。据美国信息处理服务组织协会1982年的调查报告显示，1981年有6 178家企业，从业人员413 000人，总营业额为221亿美元，比上年增长24%，其中，软件产品增长率高达45%。美国计算机服务业情况见表3.5-5。

日本计算机服务业在20世纪70年代和80年代初不断发展。1973年至1981年，日本从事计算机服务的公司从1 105家增加到1 799家，营业额从1 671.6亿日元增加到8 056.9亿日元，从业人员从58 723人增加到105 898人，详见表3.5-6。

表 3.5-5 美国计算机服务业概况

服务类别	1980 年		1981 年		增长率
	营业额（百万美元）	构成比（%）	营业额（百万美元）	构成比（%）	1980～1981（%）
远程计算服务	4 374	24	5 117	23	17
批处理服务	3 332	19	3 830	17	15
设备管理	989	6	1 114	5	13
（小计）处理服务	8 695	49	10 060	45	16
应用软件包	1 443	8	2 191	10	52
系统软件包	1 436	8	1 974	9	37
（小计）软件产品	2 879	16	4 164	19	45
为政府开发软件	1 806	10	2 110	10	17
为民间开发软件	2 311	13	2 882	13	25
（小计）专业服务	4 117	23	4 993	23	21
系统集成	2 157	12	2 884	13	34
合计	17 848	100	22 101	100	24

表 3.5-6 日本计算机服务业概况

年份	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
公司数	1 105	1 322	1 276	1 276	1 640	1 672	1 761	1 731	1 799
职工人数	47 675	58 723	57 164	59 025	71 641	77 087	90 731	93 271	105 898
营业额（亿日元）	1671.6	2452.6	2750.9	3069.7	4125.8	4602.4	5966.1	6698.4	8056.9

西欧各国的计算机服务业也比较发达，其中，法国居于首位，它有 700 多家计算机服务公司，像 CIS1、SG2、CS1、CAP-Gemini 都是有两三千人的大公司，1981 年法国计算机服务营业额为 21.14 亿美元。德国计算机服务业在西欧居第二位，1981 年营业额为 13.34 亿美元。英国居第三位，1981 年营业额为 12.67 亿美元。

从事软件开发与销售软件产业是计算机服务业的重要组成部分，它兴起较晚，但发展很快。1959 年美国出现了第一家独立的

软件公司，并开始建立软件产业。日本、法国、德国、英国随后在1966～1968年期间也先后开始了本国软件产业的建立。这些国家开始组建软件产业的时候，它们分别拥有两三千台计算机。例如，1959年美国拥有计算机3 810台，日本1966年有2 977台，法国1967年有2 323台，德国1967年有3 287台，英国1968年有3 058台。随着各个国家拥有计算机数量的增长和计算机应用的发展，对软件的需求与日俱增，从而为软件产品提供了极为广阔的市场。例如，美国20世纪70年代初期的“阿波罗”计划直接需要几百台计算机，相应地需要1 000多万条指令的支持，一项计划就提供了近亿美元的软件市场。70年代末航天飞机计划进一步需要4 500万条指令支持，其软件价值达3.6亿美元。仅美国军方在70年代以后，每年软件费用就在30亿美元以上，1982年达到42亿美元。除了美国政府这一美国最大的计算机用户之外，其他的社会需求更为广泛。计算机应用是促进软件产业成长与发展的强大动力。

软件产业是一种典型的知识产业，人才是这门产业的核心资源。人员的数量、技术水平、工作能力和经验是开发软件的决定性因素。美国程序设计人员，1955年约1万人，1960年为3万人，1970年增加到16.5万人，1980年达到27.5万人，25年增加了27.5倍。虽然人员大量增加，但无论是数量还是水平都不能满足迅速发展的社会需求。据日本通产省调查，在日本软件人员中，系统工程师、高级程序员仅满足了需要量的30%，一般程序员、操作员也只能满足70%。所以各国都重视培养软件人员，采取各种方式提高现有软件人员的水平。为了确保质量，提高软件人员钻研业务的积极性和社会地位，日本从1969年开始实施考试制度，每年进行一次，到1981年共举行了13次，参加考试的有381 988人，考试合格取得证书的有56 436人，合格率为14.6%，其中系

统工程师为 3 388 人，程序设计人员为 53 038 人。

第六章 新一代计算机

半个世纪以来，计算机的发展经历了电子管、晶体管、集成电路以及大规模集成电路和超大规模集成电路四代的发展过程，计算机器件的更新换代，使计算机的运算速度提高了几十万倍，体积缩小为原体积的 30 万分之一，价格降低为原价格的万分之一。然而，在计算机本身的变化上基本还属于“量”的变化，还没有发生“质”的变化。这期间的计算机仍然是电子计算机，其体系结构也依然是冯·诺依曼型体系结构，也就是内存程序式结构，这种结构把数据和程序都存储在具有连续地址的存储器中，控制器根据相应地址，把程序和数据一个个取出、顺序执行，这就是所谓的串行处理。

由于冯·诺依曼主要是进行数的算术运算，所以它只能对数值进行存取、询问和处理，对非数值数据的处理能力则很弱。例如，这种计算机对于语句、符号、语声、图形等就没有相应的处理功能，而对于具有含糊度的信息更是无能为力，这是因为，冯·诺依曼机没有推理和判断能力。世界上大部分工作都要涉及非数值数据，随着信息社会的到来，具有含糊度的信息越来越多，而思考也多要靠推理和判断。例如，在生物学、大部分医学、法律学和企业管理学等领域的工作，几乎全靠符号进行推理，而不是依靠计算。

在设计冯·诺依曼型计算机时，人们总是尽量使其硬件简单，而靠软件去完成那些所需的功能。由于现在对计算机的功能要求越来越高，软件也就变得越来越复杂。目前软件的生产仍然是手工作坊式，生产效率低，成本高。一台计算机软件的生产成本，已

接近整个系统成本的80%，因而出现了“软件危机”。例如美国在1982年完成的IBM 380IK操作系统MVS/XA其程序已越过2 000万条指令。如果按平均每人一天开发5条指令来计算，那么，MVS/XA所需的软件开发人数便十分庞大。

冯·诺依曼型计算机是进行顺序操作的，即做串行处理和按地址检索。这种方式的操作速度较慢，成为“瓶颈”，使得进一步提高整个系统的处理速度的工作受到很大限制。

由于冯·诺依曼型计算机存在这些缺点，已经不能满足未来社会的需要，所以需要开发新一代计算机。

有人认为到了21世纪，人类进入“知识信息”社会。在“知识信息”社会里，物质的生产基本上实现自动化，人的活动领域则逐渐地转移到以生产知识和智能为中心的思维生产领域中来。设计、技术开发、研究、决策等思维活动，将成为经济活动的主体。那时社会的重要问题是知识的创造及知识的处理这类思维问题，衡量社会进步的标志也将是思维生产率。为了提高这种思维生产率，人们将需要一种能够高效率处理知识和信息的机器。另一方面，随着科学技术的加速发展，思维活动的领域也相应扩大，那时人们还将需要一种具有思维能力的智能机器。新一代计算机就是为了解决这两方面的问题，适应“知识信息”社会的需要而产生的。

新一代计算机在未来社会中的作用，一是分担人的一部分思维活动；二是进行“知识信息”处理。为了实现这两个目的，各国在研究和开发新一代计算机上展开了激烈的竞争。就计算机科学技术而言，美国和日本在世界上仍处于领先地位，西欧各国也奋起直追。为了在计算机这个高技术领域的竞争中立于不败之地，各国都有开发新一代计算机的计划。

在新一代计算机的开发中，最引人注目的是人工智能计算机、

光计算机和生物计算机等。它们采用了不同于冯·诺依曼型计算机串行处理的数据流结构的元器件，因而在处理速度和功能方面都有突破性的飞跃。

6.1 第五代计算机——人工智能计算机

第五代计算机是相对于第四代计算机而言的。日本的“第五代电子计算机系统（FGCS）计划”始于1979年。1982年，日本成立了ICOT（新一代计算机技术委员会）作为实施这一方案的核心组织，由渊一博任研究所长兼ICOT常务理事，东京大学教授元冈达具体负责。该组织还从富士通、日立、日本电气、三菱、松下、夏普、东芝等大公司和两个国立研究所（日本电话电报公司的武藏野研究所和通产省电子技术综合研究所）借调了42人。整个方案预计10年完成，投资1 000亿日元。整个计划分为三个阶段，1982～1984年为第一阶段，任务是收集人工智能和计算机科学等领域里的知识和信息，对FGCS方案进行评价和修改。1985～1988年为第二阶段，任务是建立、形成和改进软件与硬件的基本模型和基本体系结构，试制一个中小规模的子系统。1989～1991年为最后阶段，重点是研究软件系统和硬件系统之间的功能分配，计划于1990搞出原型机，1991年实现FGCS计划目标。

日本研究的第五代计算机，也叫人工智能计算机。这种计算机具有以下几种主要功能：

（1）解题和推理功能。该计算机能够根据自身存贮的知识，进行逻辑推理和判断、独立求解问题。逻辑推理过程，实际上就是描述思维的过程。由于第五代计算机具有这种功能，所以它具有逻辑思维能力。

（2）知识库管理功能。该计算机能够有规则地存贮大量知识，可供随时检索、提取和使用。

（3）智能接口功能。有了这种功能，计算机能够识别自然语言、图形、图象，人们可以直接用自然语言与计算机联系。

（4）智能程序设计功能。该计算机能够根据给定的问题，自动地合成对应的程序。这种计算机具有翻译功能，可以把指定的一种语言翻译成另一种语言。

1. 体系结构

第五代计算机若要具有以上功能，当然要依靠新的体系结构。与冯·诺依曼机的体系结构相比，它的体系结构有两点不同：其一，不只是进行单纯的数值数据处理，而是要进行知识的智能处理；其二，不是做串行处理，而是做并行处理。新体系结构由解题推理系统、知识库系统、智能接口三大系统组成，每个系统又分为硬件和软件两部分，如图 3.6-1。下面，我们结合上面提到的四种主要功能来介绍这种第五代计算机的体系结构。

（1）逻辑推理机。它是解题推理系统的硬件，相当于现在计算机的中央处理器（CPU），所不同的是，后者是对数值数据做串行处理，而前者是对知识做并行处理，因而它实际上是一个数据流结构装置。冯·诺依曼体系结构也叫指令流结构，它是先有指令，后有数据，指令驱动数据流动；指令一条一条顺序执行，数据串行流动。新的数据流结构则是先有数据，后有指令，数据驱动指令，只要所需数据到齐，指令便自动并行执行。例如，要计算 $a=(b+c)(b-c)$ 这个式子，现在的计算机是按顺序先计算出 $d=b+c$，$e=b-c$，再计算 $a=d\times c$；而数据流结构，只要 b、c 到齐，便同时执行 $d=b+c$ 和 $e=b-c$，得到 $d\times e$。怎样实现数据流结构呢？20 世纪 60 年代的做法是把十几台或几十台计算机合并起来使用，这样做结构异常复杂，因而一直没有得到发展，现在由于超大规模集成电路的发展，已经可以把成千上万个硬件单元并联起来，组成数据流结构，此结构包含的硬件单元越多，并行

处理的能力就越强。逻辑推理机的开发目标是能在每秒钟进行一亿到十亿次逻辑推理。

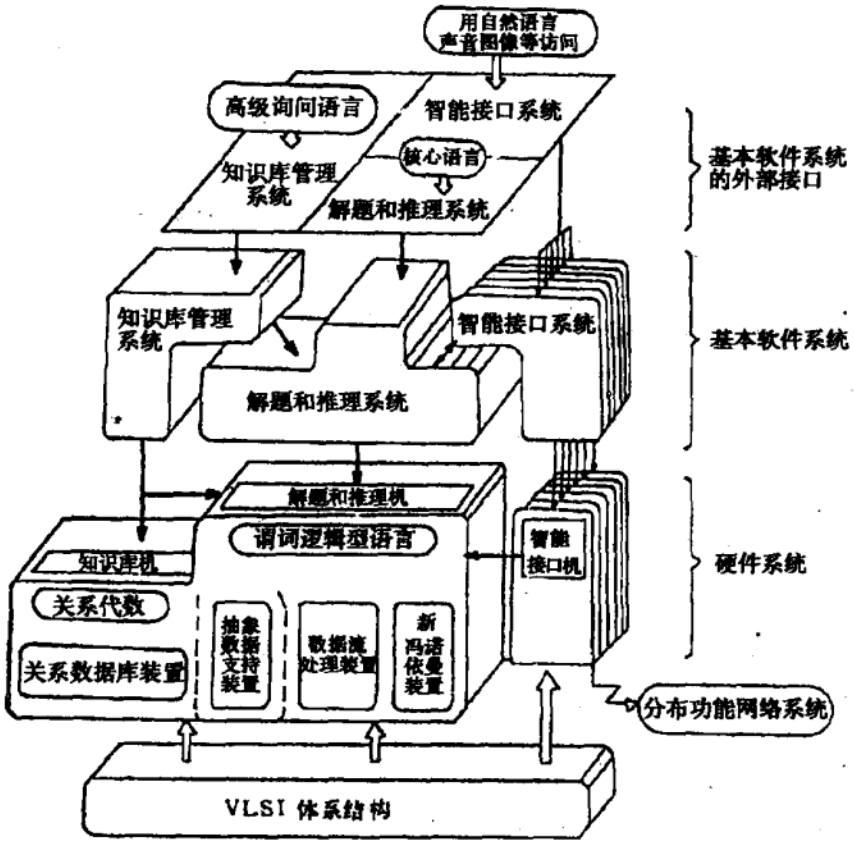


图 3.6-1 第五代计算机系统的基本配置

解题推理系统的软件是由两部分组成的，一部分是在并行推理的基础上用作解题推理用的软件模块，另一部分是在并行推理的基础上用作解题的基本软件。解题用的基本软件以元推理为基础，而元推理系统的作用则是疏通各个目标之间的信息。

（2）知识库机。它是知识库系统的硬件，相当于现在计算机

的存贮器，但是存贮内容、存贮容量和检索方式都不同。知识库机的核心是关系数据库，它是一个具有不同层次的存贮结构，容量很大。知识库要求做快速检索，采用目前按地址顺序检索的方式显然不行，因此用的是高度并行处理方式，即相关检索。所谓相关检索，就是在同一时间内把相互关联的知识同时检索出来。

关系数据库里所存贮的知识，通常用两种方法表示出来：一种是目标表示，一种是规则表示。在用规则表示时，一条规则由“条件”和“结果”两部分组成。所谓条件，就是“假如……”；而结果，就是“那么……”。举例说，关系数据库里存放着辨别动物的知识，可以判断7种动物，一共有15条规则：规则1，假如该动物有奶，那么它是哺乳动物；规则2，假如该动物吃肉，那么它是食肉动物；规则3，假如该动物有羽毛，那么它是鸟；等等。如果问计算机，麻雀是什么动物？知识库便会迅速检索出存贮的所有相关的“假如”，送到解题推理系统，经过推理、判断和求解后，得出麻雀是一种会飞的鸟的结论，并做出回答。不仅如此，计算机还会说出麻雀的大小、重量、颜色、食性、分布区、栖息地和繁殖方式等，这些信息都储存在关系数据库里相应的上千个文件存贮空间中。关系数据库的开发目标是1 000～10 000亿字节，能存贮数万条推理规则和有一亿个目标。据美国一位科学家的估计，如此大的知识存贮量，足以存入一整部《大英百科全书》的知识。

知识库系统的软件，就是对存贮在关系数据库中的知识进行管理，即对文件进行自动更新、追加和修改，并把相关知识加以适当组织，以便于检索。知识库系统的软件也由两部分组成。一部分是关系数据库管理子系统，包括5个模块，即知识获取模块、知识对话模块（与外部接口）、知识接口模块（放在前两个模块之间）、知识操作控制模块和知识存贮模块（与知识库机相连），用来对知识进行存贮管理，另一部分是知识描述子系统，其结构如

图 3.6-2 所示。

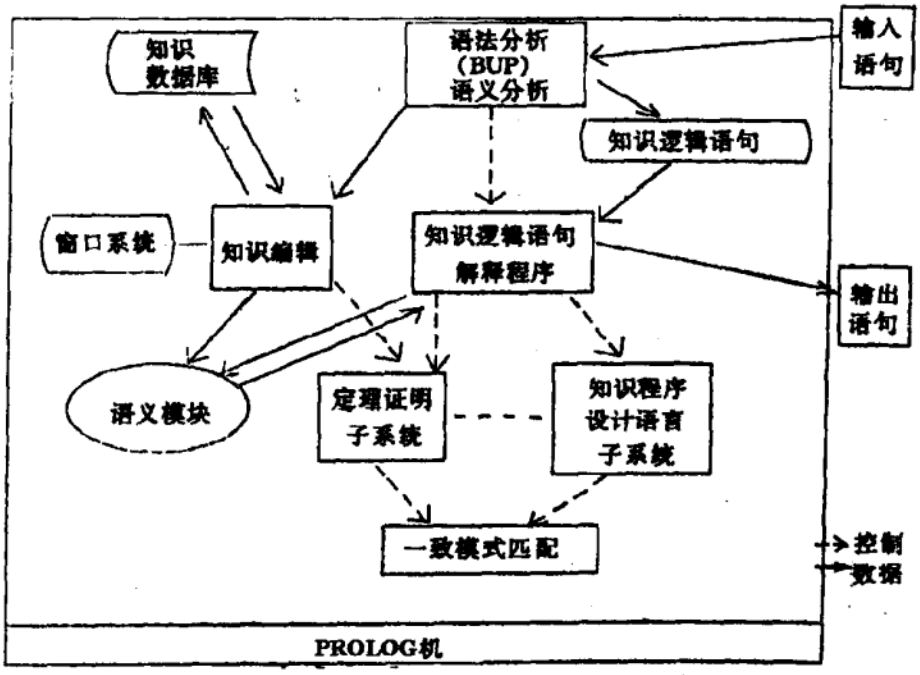


图 3.6-2 知识描述子系统方框图

(3) 智能接口机。它是智能接口系统的硬件，相当于冯·诺依曼型机的 I/O 接口。对于智能计算机，智能接口系统相当于人的眼睛、耳朵、嘴和手等感觉和动作器官。智能接口机分成若干机档，分别处理声音（识别与合成）、文字和图象等。

智能接口系统的软件主要是用来理解人的自然语言的。计算机理解图象的技术已经比较成熟，但理解自然语言，即使对于第五代计算机也是一个难题。人与人之间对话，即使没有把应有的信息全部说出来，对方也能明白。对于那些双方都了解的事，听话人可以通过类推去理解说话人省略掉的意思。第五代计算机准备用三个模块来解决这个难题，它们是高性能语言、语义分析模块、上下文理解模块和电子词典。

这里所说的电子词典，实际上是把单词以电子方式存贮起来

的一个大型数据库。目前，日本已经开发出了电子化的日语词典、英和词典、和英词典及英语词典。据悉，日本的日电、东芝、日立等 8 家公司联合成立了一个公司，正计划专门为第五代计算机开发一部电子词典。该电子词典拟收入 30 万个基本词、10 万条技术术语、30 万个概念系统词以及 30 万个概念形容词。该计划已投资 3 亿日元，预计 7 年内还将陆续投资 200 亿日元。

（4）智能程序设计模块。对于第五代计算机，当给出一个问题让它解决时，人们不必像现在这样要预先编制一个如何去解决这个问题的程序，用户只需要用自然语言，径直告诉计算机需要解决的问题，计算机便能自动地通过合成编制出解决这个问题的程序。早已编制好的基本程序模块已预先存放在知识库中，解题推理系统和知识库管理系统，会按照所需解决的问题自动找出所需要的模块，把它们组成解题程序，自动完成程序设计任务。

2. PROLOG 语言

PROLOG (Programming in Logic) 语言是第五代计算机的核心语言，或者说是“机器语言”。这是一种逻辑程序设计语言，是法国马赛大学的科尔梅洛等人在 1972 年开发的。冯·诺依曼型机的机器语言通常是一种低级语言，而 PROLOG 语言则是一种非常高级的语言，能够使第五代计算机的硬件按照逻辑思维工作。在用 PROLOG 语言编制程序时，不需要把要执行的每一个步骤逐一描述出来，而只需写出推理规则，机器就能在试探中寻找答案。用这种语言还能够解决不确定性问题，即通过搜索多种可能性，找到问题的答案。PROLOG 语言的另一个优点是它可以表示问题中固有的并行性，从而使硬件工作在高度并行状态下。第五代计算机各个系统的软件和硬件之间也是靠 PROLOG 语言来通信的。第五代计算机除了有机器语言供系统程序员使用外，还有供程序员使用的中间语言（知识描述语言）以及供用户使用的用户语言

(自然语言)。

第五代计算机的体系结构是一个高度并行处理的体系结构。这种体系结构借助于基本软件系统来完成知识信息的处理，基本软件系统则是按照逻辑型程序设计的。第五代计算机的方案如图 3.6-3 所示，其基本软件系统如图 3.6-4 所示。

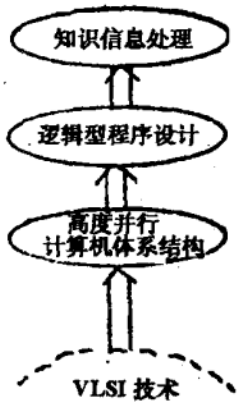


图 3.6-3 第五代计算机方案

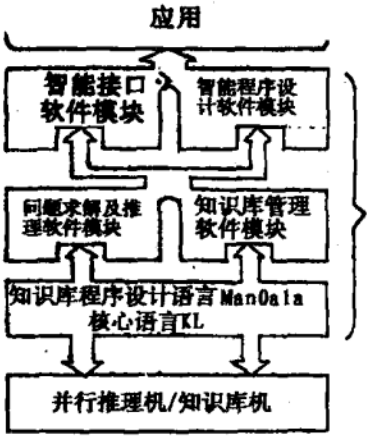


图 3.6-4 基本软件系统

3. 计算机研究的冲击波

当今世界在计算机技术领域领先的仍然是美国，日本比美国落后，尤其是软件落后得更多。但是日本敢于挑战，特别是它的第五代计算机的开发计划，引起了美国朝野的震惊，更使美国的一些有识科学家感到恐慌。麻省理工学院教授德尔道索斯说："第五代计算机的冲击，将使美国陷入比汽车远为严重的境地。因为计算机将成为未来所有变革的基础，谁控制了信息革命，谁就更能控制全球政治。"在美国，不但汽车市场已被日本占领，电子产品市场也在被日本占领。1986 年，美国从日本进口的电子产品达 237.8 亿美元，而向日本出口的只有 29.3 亿美元，仅此一项产品的贸易逆差即达 208.5 亿美元。日本的第五代计算机如果进入市场，将有可能使美国的计算机被挤出市场。最初，美国计算机科

学家和工程师对日本的 FGCS 计划还不以为然，他们认为日本人没有那种创造能力，把它当作一种神话。但是，在 1984 年 11 月，当在东京召开第二届 FGCS 国际会议时，日本向来自近 30 个国家的科学工作者显示了他们的 FGCS 的前期成果，用 PSI 顺序推理机表演了作曲，用 DELTA 关系数据库机表演了检索信息，并展示了他们的 DVALS 自然语言理解系统，这一切使美国和西方人开始坐立不安了。正是在日本的 FGCS 计划冲击下，美、英、法、德等国也相继成立了新一代计算机的研究开发机构，并投入了巨额资金。

4. 对未来世界的影响

第五代计算机的出现必将对未来世界产生重大的影响，以下是科学家预测的几个方面。

（1）通信网络智能化。不久以后，完全可能将电话、数据通信、电传等各种独立的通信网络与第五代计算机连接在一起，组成一个统一的数字通信网络，从而形成一个信息网络系统，如图 3.6-5 所示。目前，已出现这样的信息网络系统，只是它用的还不是第五代计算机而是智能化功能还不完善的计算机，通常称它为

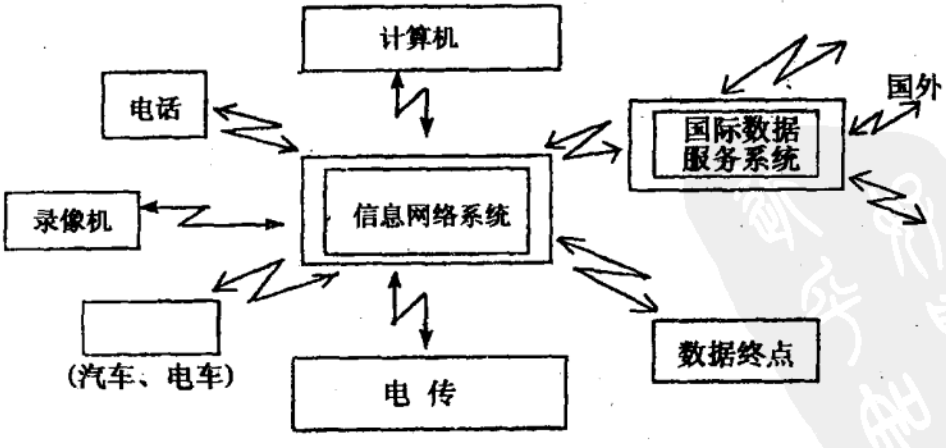


图 3.6-5　信息网络系统方框图

多媒体。当这种信息网络配有第五代计算机后，它将是智能化网络。人们可以用自然语言与计算机对话，获取各种知识。一个国家的这种通信网络，如果同国际电话电报公司的 VENVS（国际数据服务系统）相连接，就能与国外的数字通信网进行信息交换。通过机器翻译系统，用户用本国语言便可以自由访问国外的知识库。这种智能化的通信网延伸到社会各个角落，肯定对社会进步会产生不可估量的影响。

（2）信息产业发生巨大变化。所谓信息产业，就是把信息作为商品出售的产业，如：报纸、出版、广播、电视等。由于用户可以利用配有第五代计算机的高智能化的信息网络系统，可以打破语言障碍，用本国语言直接收听和收看外国的节目。不同国籍的人在自己国家里用本国语言便能参加国际会议，这样一来，国际间的相互交流自然会变得更加容易。报纸和出版业也会改观，编辑人员可以通过自然语言借助声音，把出版信息输入到第五代计算机内，让计算机进行语法检查和误字订正等工作，然后再输送给通信网络。如果用户把家庭的个人计算机和网络联网，或者使用高智能化的信息网络系统，他便可以坐在家里收看到各种信息，包括商业贸易信息、金融信息以及图书馆中的图书、杂志资料等。而新闻报道通过通信网络进入千家万户，分发报刊的事将不复存在。同样由于电子邮政成为可能，电报和书信方式也成为过时。所以到了 21 世纪，报纸、出版、广播与电视这些信息产业之间的界线将逐渐消失。

（3）社会知识化。随着第五代计算机和信息网络系统的出现，人们思维活动的场所不再像现在这样限定在某些特定的地点，而是人们不用出门便可以获取到各种信息和知识。例如教育，人们不必到学校去，在家里通过 CAI（计算机辅助教育）就能得到学习指导。人们也不必到图书馆去，在家通过信息网络便能查找到

所需要的书籍和资料。利用第五代计算机，人类在自身智能之外又获得了体外的第二智能，它能分担人的一部分思维。

对于日本所以要搞 FGCS 计划有两种说法，一种说法是日本想改变“日本人是一个善于模仿但缺乏创造的民族”形象；另一种说法是，日本是一个资源贫乏的国家，日本研制第五代计算机是抱着知识是一种可贵的经济商品的观点，想把知识作为一种商品向其他国家出售，这是它谋求经济安全的一种重大的战略性投资。

6.2　光计算机

1984 年 5 月，由伦敦传出一条信息：欧洲共同体已拨款 140 亿美元，计划在 20 世纪 90 年代研制出世界上第一台光计算机。实际上美国和日本在研制第五代电子计算机的同时，对光计算机也投入了研究力量。近年来，国外光计算机的研制工作进展得很快，在技术上已取得了突破，人们已经能够看到实现这一设想的前景。

1. 光计算机的特点

与电子计算机相比较，光计算机至少有三方面优点：第一，光子产生的开关动作比电子快 1 000 倍（在电子计算机中，电子信号的周期通常是纳秒级，即 10^{-9}秒，而光信号可达飞秒级，即 10^{-15} 秒，因而光计算机的运算速度要快得多，其运算能力可超过每秒 100 亿次；第二，光子没有电荷或质量，它对其他临近的光子没有影响，能互相径直穿行，这一特性对计算机并行处理结构特别有利；第三，光计算机的存贮容量比电子计算机大得多。

电子计算机的运算速度所以受到限制，除了电子的开关动作比光子慢得多以外，主要是因为实现电子计算机的高度并行处理受到种种限制，即便是第五代电子计算机也是如此。最大的限制是电信号不能交叠传输，因为它们之间会互相干扰。但是在光计

算机内，传递信息的激光可以交叠传输，互不干扰，因而容易实现高度并行，实现超高速运算。据估计，光计算机的运算速度将比电子计算机高出几个数量级，处理数据的速度能达到 50～10 000亿次/秒。用激光存储，容量也比电子计算机大得多。例如已经达到实用阶段的光盘只读存贮器（CDROM），它可以存贮 22 万个打印页，相当于 1 500 个软盘所存贮的信息，也远远超过电子计算机所用的半导体存贮器和软盘存贮器的容量，新出现的一种叫做“光谱烧孔法”的光存贮方法，能够在同一空间里存贮许多全息图案，以后使用适当光源便可以将这些信息分别读出。用这一方法，能在一块一平方厘米面积的材料里存贮多达 10^{14} 比特的信息。

计算机与光纤通信结合而构成的计算机光纤通信网络，是今后通信发展的趋势。因而，光计算机的另一优点就是容易与光纤通信组网，无需经过光电转换，此外，光计算机还具有结构简单、灵活可靠的优点。

2. 光计算机技术

光计算机目前还处在研制各种基本元件和突破一些关键性技术的初始研究阶段。在这一方面，英国瓦特大学的教授 S. D. 史密斯所领导的一个研制小组发明的光计算机的基本元件——光向量变换器（光变管）是一项重大成就。光变管由 GaAs 材料制成，可用作光计算机中的记忆和存贮单元，它在激光的作用下工作，对光计算机的重要性相当于电子计算机中的晶体管。但是，光变管的开关速度能达到几皮秒，比晶体管开关速度快几百倍。光变管的组合能力也比较强，计算机所用的“门电路”，要用 3～6 个晶体管才能组成，而用光变管，一个就可以胜任，此外，一个光变管装置可进行多束光线的不同运算，而晶体管装置却不能对多个电信号同时进行运算。实现光计算机的技术途径，光学界的权威

人士认为有三条，即模拟光计算、硬件间的光连接和用光学双稳器件实现全光计算机。

(1) 模拟光计算。它是随着近 20 年来传统的光信息处理技术的发展而出现的。这种计算方式是充分利用了光的空间带宽与时间带宽的大数值乘积来实现多通道的高速并行运算，并在某些领域已得到了应用，如图象处理和波谱分析等。但是，这种方式适用性较差，而且模拟计算的精度也不够高。

(2) 硬件间的光连接。现在的电子计算机的计算容量很难进一步提高，一个重要的障碍是在通信方面。这就是说，除了传统的硬件结构因连通性较差而引起的瓶颈现象外，带宽和时钟偏移也都限制了数据速率进一步提高，而这却不是仅仅靠提高开关速度所能解决的。为了使系统的时钟周期和脉冲宽度减小，摒弃那种用昂贵的、笨重的而且能耗较大的同轴电缆实现的机与机之间的连接，因而改用高速低耗的光纤来实现连接，这已显示出极大的诱惑力。预计将来还可能实现板与板之间、芯片与芯片之间的光连接。

(3) 全光计算机。随着光学非线性材料的出现和半导体光电集成技术的日趋成熟，新的二进制光逻辑元件正在不断被研制出来，这就为实现全光计算机准备着条件。例如，光学双稳性器件 (OB) 的研制成功就是一项重大突破。

所谓光学双稳性，就是一个光输入对应于两个稳定的光输出的那种特性。利用光学双稳性器件可以实现许多种功能，如光开关、光记忆、光逻辑、光脉冲产生和整形等。因此，光学双稳器件将成为全光计算机的基本元件。1984 年，日本 NEC 公司成功地研制出一种“非均匀激励的半导体”双稳激光器，开关时间短 (小于 1 纳秒)、放大倍数高 (大于 20 分贝)、结构简单、易于集成化。这种性能优良的光学双稳器件的诞生，被认为是日本 1984

年在微电子技术上所取得的重要成就之一。

研制成光学双稳器件是研制全光计算机的第一项突破，第二项突破是研制成光集成回路（集成光路）。欧洲共同体以英国瓦特大学为中心的一个研制小组，在1985年研制成功第一块全光学数字计算回路。

集成光路与集成电路相似，它把许多光学元件，如激光器、光变管、耦合器、薄膜透镜和棱镜等，全都制作在一块很小的衬底上，用薄膜光波导构成光路。薄膜光波导的导光原理与光纤维是一样的。集成光路有较复杂的光学功能，它用在光计算机上，就像集成电路用在电子计算机上一样，能完成信息的传递、贮存和处理。目前，集成光路的研究十分活跃，已提出了多种设计方案，而且相应地有一些器件研制成功，例如178兆赫（kGHz）的光中继器，就是把砷铝镓激光器、场效管和光电二极管集成在砷化镓衬底的一块芯片上的一种器件。此外还有把砷铝镓/砷化镓激光器和4∶1倍增器集成在砷化镓衬底上的发送器等。估计在不久的将来集成光路就会被应用到光计算机中。

3. 光计算机的应用

光计算机的应用范围很广，在军事方面：控制大型复杂的通信网、处理超高清晰度的图象、处理瞄准、兵器控制和导航等信息；在科学技术方面：进行飞机和航天器设计中的空气动力学计算、模拟核爆炸、破译密码、解决机器人的视觉和人工智能方面的问题等。未来应用于卫星上的光计算机，还将具有重量轻、体积小、故障容许率高、抗辐射和可靠性高等优点。

科学家们认为，光计算机的真正实现还需要解决许多问题。不仅造价高有待降低，还有许多技术难关需要克服，何况不少基本元件短时期内尚不能达到实用要求。所以光计算机的研制成功还需要经过一段艰苦的努力过程。

6.3　生物计算机

虽然电子计算机被称之为电脑，然而，它只是在处理知识和信息的速度上比人脑快，它在立即识别复杂信息的能力上，在根据已有经验制定计划和策略的能力上，以及在学习、推理和思维能力上，都无法与人脑相比拟，人脑经历了漫长的35亿年的生命进化，包含有100亿个神经元，1 000亿个供氧细胞，每一个神经元都与100～10万个其他神经元相连，形成一个复杂得几乎无法想象的网络。电脑则只是人类40年艰辛努力的结晶。有人估计，目前的电脑只有相当于6个脑细胞的功能，即使是第五代人工智能计算机，它也只能模仿人脑的一些低级的功能。

人的脑细胞和脑神经所形成的脑神经网络，实质上可看成是一部神经计算机。未来的模仿人脑的生物计算机，是由相当于脑细胞的生物芯片元件和相当于脑神经的信号线路所连成的网络组成的。由于生物芯片是建立在生物学基础上的，而信号网络是建立在电子学基础上的，所以，生物计算机是生物学和电子学技术相结合的产物，也称做神经计算机。

生物芯片由蛋白质分子构成，蛋白质分子是球状分子，被认为是像有机玻璃和硬橡胶一样具有力学弹性的固体，其不同方向有不同弹性。蛋白质分子有很强的“活性”，类似于人的神经细胞，由这些分子构成的生物芯片能够按照要求自行组合和再生出新的微型电路，这就相当于在人脑思维过程中脑细胞的自行组合和再生。因此，生物芯片是生物计算机的基本元件。蛋白质分子又具有控制电子流通或截止的特性，因而可以通过电子建立起相当于神经网络的信号网络。

生物计算机要与人的大脑媲美，首先要解决两个主要问题，一是要有巨大的存贮容量，二是要有并行处理信息的能力。人脑的

每一个细胞都是一个存贮单元，因此人脑贮存信息的能力是惊人的。在生物计算机的生物芯片上，每一个蛋白质分子都可以是一个存贮单元。由于蛋白质分子具有低阻抗、能耗极低、基本上无散热问题等优点，因此生物芯片的集成度能够做得很高。如果采用“活性”极强的蛋白质，可以用其做成三维立体排列的存贮器芯片，从而能轻而易举地做成有 10 亿兆位的生物存贮器。生物计算机再把并行处理问题解决，就能具有模仿人脑的功能。

目前电子计算机的运算速度超过人脑，生物计算机的运算速度远远超过目前的电子计算机。例如，把蛋白质涂敷在薄膜上所形成的生物芯片，每平方厘米上含有 10^{12}个以上的活性分子，这块芯片就能以每秒 10^{12}次的速度开或关，因此生物计算机比最新一代计算机的速度还要快 1 000 倍。

由生物芯片制成的生物计算机，是一种完全摆脱了软件约束的高智能计算机。可以与人的大脑相媲美，能实现人类所追求的“智能”解放。日本、美国和英国都投入了人力和物力开始研究生物计算机。东京工业大学的赤他教授所领导的一个研究小组，已用蛋白质制成了一种生物逻辑元件，叫做“细胞色素 C”蛋白质生物半导体。由于蛋白质分子具有使电子通过或不通过的功能，即有控制电子流通和截止的特性，所以，用这种分子制成的生物半导体加上电压时会出现一种奇妙的现象。例如，使外加电压从 −0.5 伏至 0.5 伏反复变化，生物半导体会显著改变透光度，反复显现橙黄色和粉红色两种颜色，对应于两种状态。这种奇妙的性能完全符合对显示元件和光变换元件的要求，从而可以把这种生物芯片当成生物逻辑元件。如果改变细胞色素 C 的“环境”，还可以大大提高它的“活性”。1986 年，该研制小组宣布又研制成功一种生物芯片，新的芯片也是由蛋白质细胞色素制成的，其存贮容量比常规半导体芯片大得多。

日本富士通公司还开发了相当于几十个脑细胞功能的一种机器人用的“人工脑”，人工脑与人的大脑相比当然相差甚远，不过与目前只有相当于几个脑细胞功能的计算机相比，则是一个飞跃。富士通公司还计划研制一种有更高一级功能的工业机器人用的人工脑。日本政府计划在2013年开发出相当于10 000个左右大脑细胞的人工脑。

目前对生物计算机的研究尚处于萌芽阶段，估计在2000年之前，还只能进行一些基础研究。生物计算机究竟什么时候制成并造福于人类，目前还难于做出预料。

第四篇
光电子学的发展

第一章 光电子学的出现

1.1 光电子学出现前的研究

根据国际无线电咨询委员会(CCIR)采用的定义，电波(Radio Wave)是频率为10kHz至3 000GHz(波长100μm)的电磁波。这就是说，可见光和红外光虽然是电磁波，但它不是电波。

然而，随着激光器和光通信的进步，光波和电波的处理技术大致相同，而区别两者的根据逐渐变得薄弱。因此，1981年8月在华盛顿市召开的国际电波科学联合会(URSI)第二十次次总会中，把URSI的D分会场的名称从Physical Electronics改为Electronic and Optical Devices and Applications，在URSI的活动中公认了与光波有关的调查研究工作。

从电通信工程学的发展历史中看出，20世纪50年代出现光电子学之前，经历了长达几十年的所谓的准备时期。电通信的历史是从1835年Morse的电信发明开始的。而后，19世纪中有了1876年贝尔的电话发明、1896年Marconi的无线电信的发明等划时代的发展。在Marconi的实验中最初使用的频率约为10kHz的载波，以后逐渐开拓了波长更短的高频载波。

某种频率的电磁波能够在通信中使用的前提条件是应首先有能够产生相干性好的电磁波的器件。经过二十几年的努力之后完成了实用的通信技术。而 1960 年之前相关技术发展很快，在相干波产生的基础技术及通信技术中，其频率大约每 6 年可提高 1 个量级。

人们为什么去研究更高频率的电磁波呢？其理由有两个：首先是因为在电磁波通信中，如果使用的载波频率越高、带宽越宽，则可以传送的信息越多；其次是在雷达中所用的电磁波频率越高，天线的方向性越好，越容易确定目标方位，这是因为如果雷达天线的尺寸为 D，波长为 λ，那么决定方向性的电磁波束的扩展角决定于 $2\lambda/D$ (rad)，所以频率越高越容易做出尖锐的电磁波束。这就是到 20 世纪中期为止的每 6 年提高 1 个量级频率的高频化的背景。但是波长达到 1mm 附近后，就遇到了基础技术及通信技术发展的停止时期，这个时期大约经历了 20 多年的漫长时间。

摆脱这种困难，迎来今天的光电子学时代的动力就是激光器和光纤维两个前所未有的新技术。从此，载波频率数不是连续提高，而是从 300GHz（短毫米波区）向 300～500THz（近红外～可见光区）跳跃式发展。基础技术的这种跳跃式发展是由激光器的出现所带来的，而通信技术的跳跃发展是由于光纤维的实用化而引起的。如表 4.1-1 所示为激光器的研究开发年表，表 4.1-2 则为光纤维的研究开发年表。图 4.1-1 和图 4.1-2 表示激光器和光纤维的研究开发的发展方框图。

表 4.1-1 激光器的研究开发年表（1970 年以后的发展将包含在以后的叙述中）

年 代	研 究 者	内 容
1951 年	普赛尔-庞德 Purcell-Pound	粒子数反转状态的实现
1951 年	法布里康特 Fabricant	粒子数反转状态中的光发射（专利）
1954 年	汤斯 Townes	脉泽振荡的成功（氨束脉泽）
1956 年	罗布尼 Loebner	光电子学的提出（EL＋光电导器件）
1957 年	渡边，西泽	预测半导体注入型激光器的可能性
1959 年	肖洛 Schawlow	预测红宝石光脉冲放大的可能性
1959 年	普洛霍洛夫，巴索夫 Prokhorov，Basov	预测半导体激光器的可能性
1960 年	迈曼 Maiman	红宝石激光器的成功
1961 年	本特，哈里奥特 Bannet，Harriot 伽凡 Javan 巴纳德，杜兰托格， Barnard，Durantourg 麦克伦格 McClung	He-Ne 激光器的成功 PN 结激光器的可能性（最初定量分析粒子数反转条件） Q 开关振荡的实现
1962 年	霍尔，内森 Hall，Nathan 惠斯特 Quist	半导体激光振荡成功
1963 年	克罗莫 Kroemer 纳尔逊 Nelson	提出双异质结结构的构思（GaAs-Ge-GaAs） 液相外延（LPE）法的发明
1967 年	须崎涉 林严雄	异质结发光二极管 第一届 IEEE 半导体激光器会议 用 LPE 法制备出优质异质结
1968 年	林严雄	单异质结激光器的成功，开始双异质结激光器研究
1970 年	林严雄，潘尼斯 Panish 阿尔费罗夫 Alferov 等 柯赛尔 Kressel 等	半导体激光器室温连续振荡

表 4.1-2　光纤维的研究开发年表

年　代	研　究　者	内　　容
1936 年	关，根岸	利用石英棒等光导管的光通信方式的提出（专利）
1930～1940 年		空间传输光通信的研究（海军）
1940 年		光通信实验（理学研究所与东京大学）
1954 年	自然杂志	医用纤维显示器的介绍记事
1964 年	金子秀夫	研究高纯硅的制备方法
1961～1964 年		透镜系列波导、气体透镜波导的研究
1964 年	西泽，佐佐木	玻璃光波导的提出（双层结构）
1965 年	川上，西泽	分级指示光纤维的最初文章
1966 年	高昆，霍克姆 Kao Kun，Hockam	预测光纤维的未来 (1) 实现 20dB/km 损耗的可能性。 (2) 弱波导结构（双层结构）的低弥散性的可能。
1968 年	川上，西泽	分级指示光纤维的理论
1969 年	内田，北野等 毕尔生 Pearson 等	聚光性光纤维 Selfoc 的开发 聚光性玻璃光波导 GRIN 棒的开发
1970 年	卡普伦 Kapron 等	用外付气相氧化（OVPO）法实现 20dB/km 的光纤维
1974 年	麦克策斯尼 McChesney	用改良型气相淀积(MCVD)法实现了 1.1dB/km 的光纤维
1976 年	堀口，小山内等	利用脱 OH^- 技术实现了 0.47dB/km 的光纤维
1977 年	伊泽等	发表气相轴付（VAD）法
1979～1980 年		利用脱 OH^- 技术实现了 0.2dB/km 的光纤维

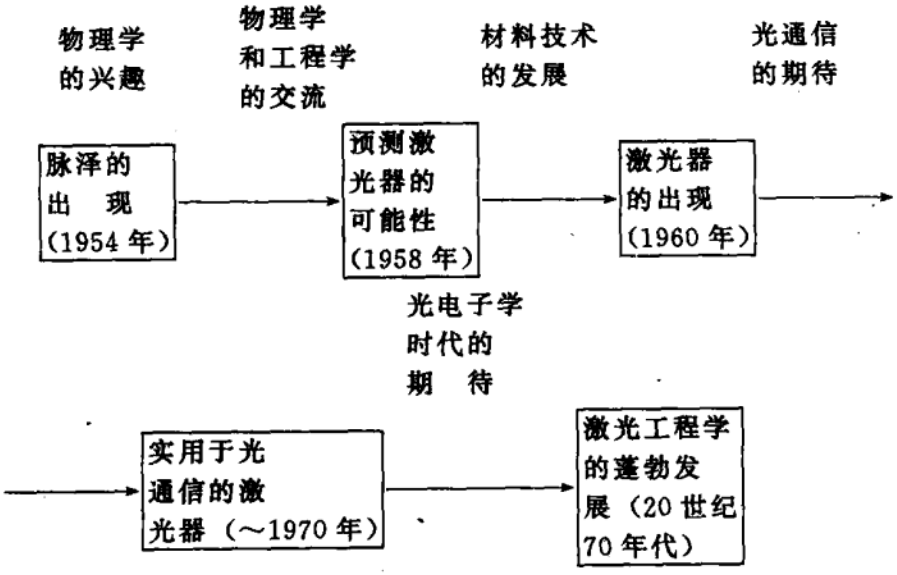


图 4.1-1 激光技术的发展图

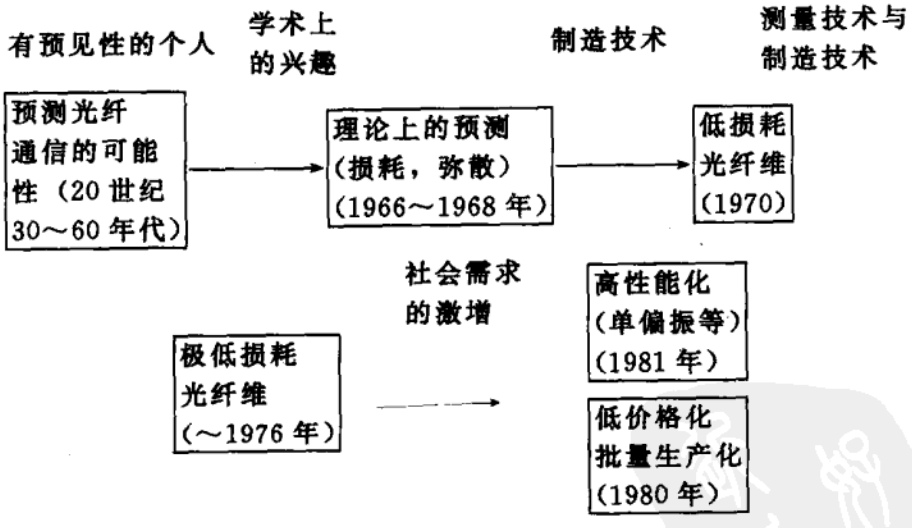


图 4.1-2 光纤技术的发展图

1.2 从电子学到光电子学

1. 光传送的历史

据说 1880 年贝尔进行了以电弧灯为光源的光电话试验；1930

年日本的八木秀次用同样方法成功地进行了光电话的试验；1931年日本东京大学的鲸井则利用白炽电灯的调制（和直流迭加）进行了可听频率的通信；丹羽尝试了电弧灯中使用振动镜的光电话；1932年则进行了电弧灯中使用卡索的光电话。受这些实验的影响，1931～1932年铃木进行了在白炽灯灯丝电流调制中，产生高效温度变化而提高调制度的实验。根据这个实验，光的传播距离达到了10km以上。只是当时人们没能想出能够克服受雨天等气象条件影响的好办法；因此，没有引起人们很大的兴趣。

为了解决光在自由空间中传播时存在的问题，1936年关和根岸提出了以石英作为光传播媒体的专利，可以说这是光纤维传播的最初的想法。在第二次世界大战中，为了通信和保密目的，再次进行了光线电话的研究。为了使其在空间传播，曾研究过红外线，但发现在光源和高速调制中存在很多困难；同时也进行了地对空光追尾信管的研究，然而，由于当时无线电通信的发展非常快，与此相比还未看出光通信的优势，因而人们放弃了进一步的研究。

2. 从微波到毫米波

二战后，微波技术的发展更加迅猛。1949年在日本进行了神代——二子间70km的PPM 23频道超多重通信实验，并于1952年在横须贺正式应用，以此为基础决定了微波超多重通信方式的实用化。1949年开始的贝尔研究所的三极管方式的新闻，尤其是1951年4 800km横跨大陆的TO-2方式的成功影响了日本，于是在日本提出了微波中继站的立案；1948年由美国开始了行波管和速调管的研究。当时研究微波的目标设定为毫米波，并于1953年在日本电气通信研究所开始了这一研究；1953年贝尔研究所发表了圆型波导管。1968年水岛提出了作为长距离传输系统的超导电缆，并在1970～1978年间对此进行了研究，证明中继距离可达

50km，在极低温度下输入功率可达 60W/km。从数据来看还是良好的，但由于光电子学的出现而停止了该项研究。

3. 光纤维

如在表 4.1-2 中所示，1966 年高昆提出了光纤维前景的预测。这个消息传到了日本，并且他本人于 1967 年也来到日本向电气通信研究所等有关研究单位进行了演讲，但并没有引起很大的反响。1965 年西泽等提出的聚光性光纤维（平方律折射率分布）也搁置起来了，后来，1968 年日本电气公司研制出了这种聚光型光纤维，但其损耗值还很高。

然而，1970 年卡普伦（Kapron）等人研制成的损耗值为 20dB/km 光纤维的消息，大大鼓舞了研究工作者，尤其是率先进行光纤维研究的材料研究工作者。到了 1976 年日本电气通信研究所的成果已经达到了世界领先地位，即把光纤维的损耗值降低到了接近 0.2dB/km 的水平。

实用上最大的问题是价格问题。因此，随着低损耗光纤维的研究成功，人们对批量生产技术产生了极大兴趣，经认真研究，1975 年提出了气相附轴方法（VAD 方法），这种方法原则上可以生产出无限长的光纤维。这样就可以降低成本和价格，以后的问题就是研究出维持偏振面的光纤维和利用光纤维的测量技术。

4. 激光器

脉泽（MASER ——受激辐射微波放大器或称量子放大器）的原理来源于电子自旋共振的研究。在这个研究中人们弄清了能级间的分布函数，物理学家们已确立了负温度的概念，因此，这种研究工作进展很快。

受激发射的概念是由爱因斯坦首先提出来的。最初，想应用这一概念的是原苏联的法布里康特，他于 1951 年申请了有关专利，并进行了实验研究。从这时起，在各地研究所中产生了脉泽

的萌芽。1951 年汤斯（Townes）提出了利用氨分子的放大器，并于 1953 年实验成功。不久原苏联的巴索夫（Bacov）和普洛霍洛夫（Prokhorov）也研制出了这种放大器。

脉泽作为原子钟的频率标准而使用。1956 年基于布洛姆伯根（Bloembergen）的提案研制出三能级脉泽，作为低噪声放大器很快应用于特殊的用途中。但是由于需要低温条件，而且频带窄，所以没有广泛应用起来。然而，在激光器中情况就完全不同了，由于在光频带中有 $h\nu > kT$ 条件而完全消去了窄频带性和低温条件的必要性。因此，脉泽和激光器的原理虽相同，但在实际应用中却有很大的差别。

1957 年由 Gould 最初申请了激光器专利；1958 年肖洛、汤斯提出了光泵激光器；1960 年迈曼（Maiman）在实验中首次观测到红宝石激光振荡。1961 年伽凡等成功地研制出了 He-Ne 激光器。

关于半导体激光器有 1957 年西泽申请的专利、1958 年艾哥廉（エグレン）等提出的提案和 1959 年普洛霍洛夫、巴索夫预测的制备半导体激光器的可能性等。1962 年 9～11 月间美国三个研究所分别实现了半导体激光振荡。在这期间原苏联也获得了成功。但这些用 GaAs 制作的半导体激光器离实际应用还很遥远。

1970 年贝尔研究所的潘尼斯（Panish）、林严雄和原苏联的阿尔费罗夫（Alferov）以及美国 RCA 公司的克雷赛尔（Kressel）等利用双异质结结构实现了室温连续振荡的半导体激光器。它的实现正好与低损耗的光纤维的提案相吻合。半导体激光器的出现，人们一开始就清楚地看到了激光器长寿命化的重要性。在长寿命化的研究工作中日本的电气公司做出了重要的贡献，1973 年他们搞清楚了暗线缺陷及其产生的原因。为制备优质的外延层，日本电气通信研究所研制出计算机控制的外延炉，并指出利用无位错衬底制备长寿命半导体激光器的可能性。1973 年其寿命为 100 小

时，1975 年提高到 10^4 小时，到 1977 年则达到 10^6 小时。根据光纤通信的需要从 1976 年开始了 GaInAsP 四元固溶体半导体激光器的研究工作。

5. 光应用技术

日本电信电话公司于 1968 年开始了光应用研究计划。研讨了光信息处理装置。作为光信息存储器，最初使用了有磁光效应的 MnBi 系圆盘，1972 年已达到 10^6bt/cm^2、5MHz 水平。接着在 1970 年由日本电气通信研究所发现了 AsSeGe 系硫硒碲化合物的光黑化效应，1973 年进行了全息照相可逆存储器系统的预备实验，1975 年则发展成无机光致抗蚀剂。在 1971 年就已研讨了利用 $LiNbO_3$ 折射率光损伤效应的三维存储器。

与此相关，从 1964 年开始，科学家们就积极进行了强光学介质晶体的研究，并获得了很多优质的光学晶体。除研制出 $LiNbO_3$、$LiTaO_3$ 晶体外，还制备出 $5Pb_3 \cdot 3GeO_2$、$Bi_{12}GeO_{20}$、Pb_2MoO_5、$3BiO_3 \cdot 2MoO_3$、$PbGeO_3$、BNN、SBN、PKN 等光学晶体。除了发现新籽晶外，利用低音速 TeO_3 的光偏振光器件得到了国际上的好评。在 1970～1973 年间进行了 $LiNbO_3$ 晶体为衬底的形成薄膜光波导的光集成电路的研究，并进行了附着于衬底的硫硒碲化合物薄膜光偏振实验。

利用这些光电子学成果的典型例子就是日本电气通信研究所的光信息检索装置 PANDORA 计划。该计划就是研究试制在 35mm 软片中全息照相记录存储的数据库并高速读出的装置。以研究 TeO_2 光偏振器和全息照相多重存储器为中心题目从 1968 年一直研究到 1972 年，虽然取得了许多基础技术研究成果，但作为系统还未达到实用水平，于是停止了该项目的研究工作。

正是这时光集成电路的研究工作正在积极进行着。大约在 1968 年提出了研究薄膜中有光传播模式和低损耗膜的制备技术

在内的光调制器、光偏振器及光开关部件的提案，并有很多工作者投入了该项研究工作。当时持乐观态度的人们认为5年内能够实现实用化。当时预言的分布反馈布拉格（DFB）注入激光器，到了1982年作为高速调制用器件重新得到了很好的成果，虽然离集成化还有很大距离，但技术是一步一步前进了。然而，由于分子束外延（MBE）技术的出现，人们的研究兴趣的中心逐渐转向多层结构的多样化器件。这样，光应用研究并没有直接对光通信做出应有的贡献，这是一个不可否认的历史事实。

6. 长波长区的动向

1972年由康宁公司首先报导光纤维的损耗值降到20dB/km，虽然这个值与0.85μm半导体激光器的振荡波长相吻合，但是，众所周知，玻璃对红外波段的光更透明，而且因没有金属性杂质的影响，它将成为更良好的光波导。经过若干次考察之后，1975年提出了最低损耗波段处在1.5μm附近的预言。1979年日本茨城电气通信研究所报导了在1.55μm波段以下，最低的损耗为0.2dB/km的实验结果。

从1969年开始进行了GaInAs三元固溶体的气相外延（VPE）生长。1974年达到1μm的低温脉冲振荡的水平。当时的有关研究人员对长波长的兴趣很高涨，但是在三元固溶体生长中由于与GaAs衬底的晶格失配太大，位错密度很难控制在10^4cm^{-2}以下，因此从1976年开始改用InP衬底，而外延层则采用了四元固溶体材料。这样，1977年很快制备出了1.5μm低温脉冲振荡的激光器，1979年实现了1.5μm室温连续振荡。

对于1.5μm波段的光探测器来说，锗是可以采用的材料。1968年，在新美特别研究所成功地研制出了锗雪崩光电二极管（APD），随后研制出响应频率为2GHz的改进型GeAPD，这就是后来成为商品化的原型光电探测器。

用光纤维的损耗值来推测，当时光通信的中继距离不超过100千米，这个距离满足不了长距离海底无中继通信的要求。为了克服这个困难，1980年提出了10μm波导管的10^{-2}dB/km线路。

第二章 激光器

2.1 激光器的发明

激光器又称受激辐射式光频放大器。英文简写成Laser，是由Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation英文名词的词头字母组成的。

激光器、晶体管和原子核反应堆是20世纪的三大发明。

1916年爱因斯坦从理论上指出了由于两个能级间的跃迁引起吸收或发射光时，与自发辐射同时产生受激辐射的现象。1953年日本《电子通信学会志》在世界上最先发表了汤斯研究脉泽的具体情况。

根据热力学定律，在温度为T的热平衡状态下，上、下能级的原子数之间有如下的关系：

$$N_2 = N_1 e^{(-h\nu/kT)}$$

其中N_1和N_2分别表示能级1和2中的原子数，h和k分别表示普朗克常数和玻耳兹曼常数，ν是光频。爱因斯坦指出，在任何温度的物体中，对入射光的受激吸收比受激辐射强，结果只引起吸收。

1924年托尔曼（Tolman）首先叙述了如果在非热平衡状态中，当形成$N_2>N_1$条件时，入射光被加强而产生负吸收，然而，从上面公式中看出，当粒子数反转，即$N_2>N_1$时，媒质的温度变为负数，当然负温度是不存在的，因此，当时认为产生粒子数反

转是不可能的。

为了实现反转分布的负吸收，原苏联的法布里康特最先积极开展了这一研究工作。他从1940年开始进行了各种实验，1951年申请了专利。他尝试用He的388.9nm光谱线激励Cs原子来形成反转分布。这种激励方法虽然正确，但因所对应的受激发射的跃迁能级不合适而未能成功。如果当时他的实验能获得成功，那么，激光器的发明先于脉泽的发明是肯定无疑的，若真是这样，那么激光器发展的历史不会是像现在这样的情景。

无线电技术经过20世纪30～40年代10年的发展过程，从超短波段发展到了甚超短波段。从二次世界大战开始，人们把甚超短波称为微波。以雷达用振荡器、检波器为中心发展了各种波导管器件，实现了波长为3cm和1cm的磁控管、速调管、硅二极管的实用化，同时也进行了毫米波的实验。

从1945年开始科学家们利用这些器件进行了各种无线电光谱的研究工作，他们主要研究了对具有磁矩的原子、原子核、分子的原子线磁共振、核磁共振和电子自旋共振以及对具有电偶极矩的极性分子的微波光谱。尤其是1946年由古德（Good）、布林尼（Bleaney）、彭罗斯（Penrose）、汤斯等人研究的波长在1.25cm附近的氨分子的高分辨光谱更为引人注目。

这些新的研究领域的出现是由于二战中物理学家积极参与雷达研究的结果，是电子学和物理学相结合的产物。电子学并非是用于测定光谱的简单工具，在电子学中所引入的输入、输出、放大、反馈等概念具有非常重要的和非常深刻的物理内涵。以前的光谱学是以观察自然现象为基本目的的，认为光谱光源是诱发出原子或分子的自然行为的光，而光谱仪是观察分析它的本来面目的工具。然而，在无线电光谱中，则把测量光谱的对象——原子或分子看成是电路元件的一种，即用某一频率振荡器的输出强迫振

荡或用别的频率改变电场或磁场的参数来调制原子或分子，从而获得所需的光谱。

随着无线电光谱学的发展，在发现很多分子或原子的微波光谱的同时，科学工作者之间积极开展了在反转分布中产生负吸收的可能性以及能否产生相干放大等问题的研究。附加正反馈可制作分子振荡器的想法，对一般的光谱学者来说是很难想象出来的，因为他们缺乏电子学方面的知识。

在无线电光谱学的研究中，最引人注目的成果是1947年由兰伯（Lamb）和利赛福德（Retherford）首次发现的氢原子光谱的兰伯漂移（Lamb Shift）现象。在详细报导其研究结果的著名论文中，具体论述了观察净受激辐射（负吸收）的可能性。根据粗略的计算求出在满足适当条件下的氢放电管中$2^2S_{1/2}$和$2^2P_{1/2}$状态之间形成的反转分布，并算出当入射频率对应于两能级间跃迁的1 000MHz微波时可获得$10^{-4}cm^{-1}$左右增益的结果。

1951年普赛尔（Purcell）和庞德（Pound）在核磁共振中，用急速改变磁场的方法形成了过渡性的反转分布，并观察到了净受激辐射脉冲。但是，由核磁共振引起的净受激辐射非常微弱，不可能克服电路中的损耗产生净放大，对于这一点，大家心中都很清楚。正是根据这个实验第一次确认了净受激辐射的存在，于是增强了发明脉泽的希望，并进一步激起人们的研究热情。

在1951～1953年间，至少有三个研究所进行了在具有反转分布的媒体（放入负温度媒质的空腔谐振器或波导管）中能够产生微波谐振放大的研究工作。

首先，马里兰大学的韦伯（Weber）想通过在极性分子气体中施加脉冲电场来形成反转分布获得脉冲放大，但后来知道用这种方法不能实现净放大，因此，提出了恒磁共振磁场的反转方案，并于1953年公开发表。

韦伯的方案与普赛尔和庞德的实验相同，改变上、下能级的分子数分布来形成反转分布，由两个研究所提出了与此不同的通过只除去下能级分子的方法形成反转分布的提案。

1951 年春，哥伦比亚大学的汤斯为了参加微波控制化学反应研究委员会召开的研究会来到了华盛顿。在这期间他提出了在空腔谐振器中，若放入数量足够的反转分布的分子时，将会产生自发振荡的想法，并给出了所需分子数的阈值条件。从此，开始了具体的实验研究。1953 年他到日本演讲时，论述了当时还在实验中的氨分子线脉泽的要点。这虽然是一种波长为 1cm 左右的振荡器，但也可以做成放大器，并用同样的原理也可做成波长为 1mm 以下的振荡器。

在同一时期，前苏联列别捷夫研究所的巴索夫和普洛霍洛夫提出了制作脉泽的方法，1952 年在莫斯科召开的无线电光谱学会上公开发表。他们也和汤斯一样，在不均匀电场中，通过分子线来得到反转分布，并研究了在空腔谐振器中放入分子线时产生放大或振荡的诸多条件。虽然这些研究和计算都是各自独立进行的，但是，就其本质而言，它与汤斯的想法惊人地相似，真是英雄所见略同。可惜巴索夫等人没有采用氨分子，而是用了线型分子 CsF，因此未能取得实验上的成功。在有极性的分子中，由两个原子组成的分子是最简单的，比较容易进行理论计算，而且，CsF 只有一种同位体（$^{133}Cs\ ^{19}F$），因此其光谱纯而强，于是他们选用了 CsF。但是，在不均匀电场中，就选择上、下能级的分子的能力而言，线型分子比氨分子低一个数量级。

用氨分子进行实验的汤斯由于戈登（Gordon）和蔡格（Zeiger）两年多努力的结果，1954 年春天终于成功地获得了 23.870MHz 的振荡。巴索夫等人听到这个消息后，立刻改用氨分子进行实验，很快取得了实验的成功，同时开拓了各种新的研究

工作。

脉泽（Maser）这个术语是大约发明脉泽一年之后，1955 年 3 月由汤斯集 Microwave Amplification by Stimu-lated Emission of Radiation 中的词头字母缩写而成的，在这以前，一般把它称为分子谐振器或分子放大器。

分子线脉泽作为光谱仪或标准频率有着重要的作用。1954 年巴索夫和普洛霍洛夫最先提出了被用作低噪声放大器的三能级脉泽。但是，因使用气体介质而未能在微波波段中使用。1956 年布洛姆伯根提出了使用恒磁性晶体的想法，并于同年由 Scovil 等人利用含 Gd 离子的晶体获得了实验成功。

马科霍夫（Makhov）和木口等人提出了作为三能级脉泽的介质具有良好特性的红宝石。1957 年后，很多研究所对红宝石进行了积极的研究，作为探测器被广泛用于射电天文和卫星通信中。

如同汤斯最初认为的那样，脉泽的最大特征就是能够相干产生或放大比微波更短波长的电磁波。虽然程度上有所差异，但所有脉泽的研究者都想到了具有比微波更丰富的光谱线的红外或可见光的受激辐射的放大或振荡的问题。

然而，随着频率的增加，自发辐射则按频率的三次方急剧增加，而且对光那样的短波长来说，制备空腔谐振器或波导管是非常困难的。迪科（Dicke）提出不用如同微波形式的空腔谐振器，而用法布里-波罗（Fabry-Perot）干涉仪的提案，并于 1956 年申请了专利。他提出了靠氨分子旋转光谱的远红外脉泽，因此，他并未对近红外和可见光领域的应用研究有多大的兴趣。

当时，在固体和气体（分子线）脉泽中，虽然都实现了毫米波的振荡，但是人们认为实现亚毫米波及更短波长的振荡并不是容易办到的。可是汤斯则认为，如果能研制出有效限制光的谐振器，那么就可以制备出近红外和可见光脉泽（现在称为激光器）。

1957 年他提出了光泵气体激光器的想法，并和肖洛一起研究了决定起振阈值的诸多条件、光谐振腔的多模性对激光器振荡特性的影响、控制振荡模式的方法及形成粒子数反转的途径等重要研究课题。1958 年发表了论文，同时在哥伦比亚大学开始了研制 3μm 波段 K 和 Cs 光泵激光器的实验工作。

但是，当时并不是只有肖洛和汤斯想到组合光谐振腔和负温度介质可制作激光器的可能性并预测其未来。在原苏联，巴索夫和普洛霍洛夫同样研究了利用法布里-波罗谐振腔的激光器；肖洛也在贝尔研究所中进行了恒磁性晶体的光泵激光器。1959 年进行了红宝石荧光线共振以及微波和光的双重共振的实验。当时除了贝尔实验室之外，威斯汀豪斯（Westinghouse）研究所的威德（Wieder）等人也进行了红宝石的光泵研究。因为红宝石激光器是三能级系，为了在荧光能级和基态能级间产生粒子数反转，必须把 50%以上的 Cr 原子跃迁到激发状态。这对产生激光而言，远不如四能级系。于是，当时有人认为用红宝石制备激光器的可能性很小。

1959 年休斯研究所的迈曼制备了在液氮温度下工作的低噪音红宝石放大器，并改变 Cr 浓度和温度测定了弛豫时间。他对肖洛的研究非常感兴趣，利用 Cr 含量非常少的 0.05%的粉红色宝石进行了光和微波的双重共振实验。结果发现当照射波长为 560nm 的光时，基态的 Cr 原子数减少而激发态的原子数增加，并取得了荧光量子效率接近 1（70%以上）的实验结果，于 1960 年 4 月在物理评论通信上发表了其实验结果。他对各能级间的跃迁几率进行了研究，并确信如果用强光激励红宝石就能够制成红宝石激光器。就这样，他在上述实验中使用的 $1cm^2$ 红宝石的相对应的两个面上蒸发银后，当用闪光灯强光照射时，虽然没有产生激光，但观测到了荧光光谱线由宽变窄同时荧光寿命变短的现象，他

认为这一定是产生受激辐射的结果，因此，他大胆地把红宝石两面进行光学抛光后重复了相同的实验。于是，在1960年6月他的实验获得了成功，终于发射出了在人类历史上的第一个激光束。根据发光光谱线宽比以前更窄、方向性强、亮度高、荧光寿命短以及邻近两个光谱线的相对强度变化非常大等实验结果，得出了这无疑是激光的结论。人们企盼已久的激光器就这样诞生了。

同年7月7日在纽约时报等报纸上报导了这一具有划时代意义的红宝石激光器的发明，消息很快传播到世界各地。然而在学术刊物上的发表并不顺利，最初的论文投于物理评论通信上，但是编辑部以有关脉泽的投稿论文只限于刊载有关基础物理学的少数论文为理由拒绝刊登，改投其他学报也被拒绝了，结果发明激光器的第一篇论文最后发表在英国的《自然》和《英国电子通信》杂志上。

得知迈曼的成功消息，贝尔研究所马上进行了红宝石激光器的实验研究，经详细测量分析其特性之后，于1960年8月确认了它确实是受激辐射激光振荡而发射的相干光。迈曼在双重共振实验中使用的是边长为1cm的立方体红宝石，而在贝尔研究所使用的是直径为0.5cm、长为4cm的圆柱形红宝石。1960年在IBM研究所成功地研制出四能级固体激光器。

从前人们一直认为气体激光器比固体激光器更容易实现，但实际上恰好相反，到了1960年末才研制出第一个气体激光器。

伽凡等人在贝尔实验室进行了用气体放电形成两能级间粒子数反转的研究工作。1959年用He和Ne混合气体实现了在Ne能级中的粒子数反转，并观测到微弱的增益，根据这些实验数据弄清了给出最大增益的气体压力和混合比及放电条件。然而，为了引起激光振荡在长度为1m的放电管两端放置平面反射镜制成法布里—波罗谐振腔是非常困难的事情。在聪明能干的光学技术员

夏洛特（Herriott）的协助下，制作了平整度为一百四十分之一波长以上的平面镜，附加 13 层多层介质膜形成了反射率为 98.9% 的红外反射镜。然后，把这两个反射镜置于放电管两端制作出可精确调节的气体激光装置，再放入约 133 帕的 He 和约 13.3 帕的 Ne 气，使其高频放电获得了在 1.15μm 波长附近具有 5 个谱线的连续振荡。随即观测了光脉冲，弄清了气体激光器的显著特征就是它的光谱宽度非常窄，其谱宽小于 10kHz。



图 4.2-1　(a)、(b)、(c) 分别为因发明激光器获诺贝尔奖的原苏联的巴索夫、普洛霍洛夫和美国的汤斯

1961 年是激光器研究大丰收的一年，在这一年内陆续取得了外部镜型气体激光器、固体激光器的 Q 开关、光高次谐波发生器等重要研究成果。另外，1962 年首次出现了半导体激光器。

如上所述，脉泽和激光器的基本原理是相同的，只不过它们的工作波段即工作频率不同而已。激光器的诞生标志着人类已经

开始进入光电子时代，它的问世从理论到发明经历了近半个世纪众多科学家的不懈努力。由于汤斯、巴索夫和普洛霍洛夫对脉泽和激光器的基础研究做出了突出贡献，所以他们于1964年获得了诺贝尔物理学奖。

2.2 激光器的种类

如上所述，1960年6月诞生第一台激光器——红宝石激光器，12月则研制成He-Ne气体激光器，给人类提供了一种崭新的相干光源。从那时起经过了30多年的岁月，已制成了很多种激光器。在除了红宝石以外的晶体中也发现了激光振荡。气体激光器也陆续实现了Ar、Kr、Xe等各种波长的惰性气体激光器。1961年制成掺Nd的玻璃激光器，1962年在进行Q开关振荡实验时发现了拉曼激光，在这以后固体激光器和气体激光器增加了不少种类，也出现了与当初不同类型的许多种激光器。表4.2-1给出了其中的主要激光器。

表4.2-1 各种激光器的开发情况

激光器种类	实现脉冲振荡	实现连续振荡
固体（晶体）激光器	1960年	1962年
气体中性原子激光器	——	1960年
玻璃激光器	1961年	1970年
拉曼激光器	1962年	1970年
半导体激光器（低温）	1962年	1963年
半导体激光器（室温）	1962年	1970年
气体分子激光器	1963年	1964年
气体离子激光器	1963年	1964年
化学离子激光器	1965年	1969年
有机色素激光器	1966年	1970年
无机液体激光器	1966年	——
色中心激光器（低温）	1965年	1974年
准分子激光器	1970年	——
自由电子激光器	1976年	——

下面按工作物质分类，简单介绍各种激光器。

1. 气体激光器

气体激光器是1960年12月发明的，它是以气体或蒸汽作为工作物质的激光器，是目前种类最多、应用最广泛的一类激光器。大体上分为原子气体激光器和分子气体激光器两大类。

(1) 原子气体激光器

这类激光器的工作物质有：氦、氖、氩、氪、氙惰性气体，铜、锰、铝、镉、汞等金属蒸汽，氯、碘、溴等卤族气体或蒸汽以及离子气体等。原子气体激光器有氦-氖（He-Ne）激光器、氩激光器、碘原子激光器、铜蒸汽激光器、氩离子激光器、氪离子激光器、氦-镉激光器等。

其中，氦-氖激光器是最典型的气体原子激光器。它具有光束方向性强、单色性好、频率稳定、结构简单、使用方便、使用寿命长等优点，因此而成为被广泛应用的激光器之一。这种激光器的最强波长为3.39μm、1.15μm和632.8nm三条谱线，632.8nm线呈红色，是用得最广泛的激光波长。常用的选频方法是选用合适的介质膜镜、腔内置棱镜和外加磁场等方法。

氩气体激光器有两种，一种是掺入比氩气多许多倍氦气作为缓冲气体的，另一种是把纯氩气作为媒体的。前者的输出激光波长为3.507μm和2.026μm，峰值功率可达到G（10^9）瓦级。后者的输出激光波长只有3.507μm。

碘原子气体激光器是以氧-碘（O_2-I）为媒体的激光器，它是一种连续工作的高能化学激光器，其输出激光波长为1.315μm，与物体的相互作用比较强。有可能被应用于激光武器或用于激光核聚变和工业加工等领域。

铜蒸汽激光器的工作物质有纯铜、氧化铜、卤化铜（比如Cu-Cl、CuBr、CuI等）及铜的有机化合物等。铜蒸汽激光器是目前在

金属蒸汽激光器中最成熟并获得最高峰值功率的激光器。它的发射激光光谱线有两个，波长分别为 510.6nm 和 578.2nm，是非常美丽的绿光和黄光。

氩离子激光器是在气体激光器中常用的一种。它可同时发射许多激光谱线，其波长分别为 457.935nm、465.789nm、472.686nm、476.486nm、487.986nm、496.507nm、501.716nm 及 514.532nm，其中蓝光 487.986nm 和绿光 514.532nm 两个激光线功率最强，分别占总输出功率的 30%～40%。

氪离子激光器的结构、工作原理和特性与氩离子激光器很相似。氪离子激光器的激光输出波长在 400.0nm 到 900.0nm 范围内有数十条谱线，其中，比较重要的有 476.2nm 的蓝光谱、520.8nm 的绿光谱、568.2nm 的黄光谱和 647.1nm 的红光谱。因此，人们有时把这种气体激光器称为白光激光器。

氦-镉（He-Cd）气体激光器是一种金属蒸汽离子激光器。产生激光跃迁的是镉离子，而氦气是起能量传输作用的不可缺少的辅助气体。这种激光器通过更换反射镜可以获得波长为 441.6nm 的蓝色激光和波长为 325.0nm 的紫外激光。

（2）分子气体激光器

分子气体激光器的工作物质有一般气体分子和准分子。按照组成分子的原子数的不同可分为双原子分子激光器和多原子分子激光器。例如 CO、N_2、H_2 和 HF/DF 激光器属于双原子分子激光器、而 CO_2、H_2O (D_2O)、N_2O、HCN (DON)、CH_3F、CH_3I、CH_3OH 激光器属于多原子分子激 光器。

一氧化碳激光器是重要的双原子分子激光器。它的工作物质是一氧化碳气体，氦、氙等气体作为辅助气体。在直流电的激发下可获得波长为 5.88μm 和 5.51μm 的强激光，输出功率可达到 1～4 千瓦。

工作物质为氮气的氮分子激光器也是一种重要的双原子分子气体激光器。这种激光器有时也加一定比例的氦气或氩气。输出波长有几种，但以 337.1nm 的紫外光为主，峰值功率可达到几十千瓦至几兆瓦。

氟化氢（HF）/氟化氘（DF）激光器是一种高功率的化学激励的双原子分子气体激光器。它是利用 H_2 和 F_2 燃烧时的化学反应实现离子数反转而产生相干辐射的。因此，也称为化学激光器，其输出激光波长为 2.6～3.5μm。

二氧化碳（CO_2）激光器是一种三原子分子气体激光器。它的连续输出功率已达几十万瓦，脉冲输出峰值功率为太（10^{12}）瓦级，输出波长位于 9～11μm 之间。二氧化碳激光器的品种很多，有纵向放电激励 CO_2 激光器、纵向脉冲放电 CO_2 激光器 、Q 调制 CO_2 激光器、选频 CO_2 激光器、横向激励大气压 CO_2 激光器、高气压可调谐 CO_2 激光器、气体流动型 CO_2 激光器、气动 CO_2 激光器、波导型 CO_2 激光器等。

远红外分子激光器的辐射波长一般在 40μm 到 2μm 之间。有电激励的 HON 和 DON 激光器以及光泵远红外激光器等多种类型。

准分子是受激准分子的简称，它们的基态是排斥态，原子和原子不能结合成分子，只有在激发态时才能结合成短寿命的分子。利用这种准分子作为工作物质的激光器称为准分子激光器。其种类很多，可分为惰性气体准分子激光器、惰性气体卤化物准分子激光器、惰性气体氧化物准分子激光器、惰性气体-金属蒸汽准分子激光器、金属准分子激光器、汞卤化物准分子激光器等。表4.2-2列出了几种常用的准分子激光器及其发射波长。

表 4.2-2 常用准分子激光器及其波长

准分子激光器	发射波长（nm）
Ar_2	126.1
Kr_2	145.7
Xe_2	173.0
KrF	248.0，249.0
XeF	351.0，353.0，349.0
XeBr	282.0
XeCl	308.0
ArF	193.0
ArO	557.6
KrO	557.8

2. 固体激光器

这里介绍的固体激光器不包括半导体激光器，关于半导体激光器将在后面叙述。固体激光器是人类发明的第一个激光器，发明于 1960 年，其工作物质由基质和激活离子两部分组成。目前已实现激光跃迁的激活离子有四类：过渡金属离子如 Cr^{3+}、Ni^{2+}、Co^{2+}、Ti^{3+}等；三价稀土金属离子如 Nd^{3+}、Er^{3+}、Tm^{3+}、Sm^{3+}、Dy^{3+}、Yb^{3+}、Tb^{3+}等；二价稀土金属离子如 Sm^{2+}、Er^{2+}、Tm^{2+}、Dy^{2+}等；锕系离子 U^{3+}，它们发射的激光波长在 275～3.022nm 范围内。而基质材料分为晶体材料和玻璃材料两大类，红宝石、钇铝石榴石（YAG）和白宝石属于晶体材料，硅酸盐玻璃、磷酸盐玻璃和氟化物玻璃等属于玻璃材料。

（1）红宝石激光器

红宝石激光器是世界上第一个实现的固体激光器。红宝石是掺铬的氧化铝晶体（$Cr:Al_2O_3$），一般从 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 的熔融混合物中用晶体生长方法制备。红宝石激光器所发射的激光波长为 694.3nm 的红光，连续工作时，输出功率可达到几瓦。

(2) 钛宝石激光器

钛宝石激光器是从20世纪80年代开始发展起来的。它的工作物质是掺入钛的氧化铝(Ti：Al_2O_3)。这是一种可调谐的固体激光器，其发射波长范围为680～1.180nm，平均功率为500mW，峰值功率可达50千瓦。

(3) 金绿宝石激光器

金绿宝石也称为紫翠宝石，是掺铬的铝酸铍晶体（Cr：$BeAl_2O_4$)，激光波长能在700～820nm范围内连续调谐。目前，它是在固体可调谐激光器中输出功率最大的一种，现已研制出单脉冲输出能量达到数百焦的激光器。

(4) 钇铝石榴石激光器

钇铝石榴石激光器是用钇铝石榴石（YAG）晶体作为激光工作物基质的激光器，通常称为YAG激光器。YAG激光器常用钕(Nd)作为激活物质，称Nd：YAG激光器，在一般情况下，它的工作波长为1.06μm。Nd-YAG激光器的种类很多，比如Nd：YAG微型激光器、电光Q开关重复频率Na：YAG激光器、内腔锁模倍频Nd：YAG激光器、大功率Na：YAG激光器、掺敏化离子激光器、可调谐Nd：YAG激光器等。

(5) 氟化钇锂激光器

代号为YLF的氟化钇锂晶体的化学式是$YLiF_4$。氟化钇锂激光器在室温下能发射从紫外到红外范围内的各种波长的激光。比如Ce^{3+}：YLF激光器可在300～325nm波长范围内可调谐，(Gd，Tb)：YLF激光器的输出激光波长为544.5nm (Er，Tm，Ho)：YLF激光器产生2.065nm的红外激光。代号为LCAF的氟化锂钙铝（$LiCaAlF_6$）和代号为LSAF的氟化锂锶铝（$LiSrAlF_6$）都是与氟化钇锂相仿的晶体。Cr：LCAF激光器和Cr：LSAF激光器分别在720～840nm和760～920nm波长范围内可调谐。

(6) 铝酸钇激光器

铝酸钇 (YAP) 晶体的化学式为 $YAlO_3$。1969 年研制出第一台 Nd：YAP 激光器。我国在研制 Nd：YAP 晶体的尺寸、质量和稳定性方面有较大的突破，对激光器的设计也很有特色。目前，我国研制的波长为 1.079μm 的单棒 Nd：YAP 激光器的平均输出功率已达 780 瓦，居国际领先地位。我国首先实现了 Nd：YAP 激光器在 1 079.4nm 和 1 341.4nm 双波长连续激光振荡，其输出功率分别为 30 瓦和 33.7 瓦。

(7) 钕玻璃激光器

钕玻璃是在固体激光器中常用的工作物质。在光学玻璃中掺入适量的氧化钕 (Nd_2O_3) 可制得钕玻璃。玻璃基质按化学成分可分为硅酸盐玻璃、磷酸盐玻璃和氟化物玻璃。目前，世界上规模最大的钕玻璃激光系统是在美国里弗莫尔实验室中做惯性约束核聚变驱动用的 NOVA 装置，该系统能发射出波长为 1.05μm、能量为 125 千焦的 2.5ms 单脉冲激光或可提供波长为 0.35μm、能量为 45 千焦的 ZnS 单脉冲激光。

(8) 光纤激光器

光纤激光器 (FL) 是激光与光纤维技术相结合而产生的新型固体激光器。光纤激光器具有体积小、重量轻、形状可变、容易集成在光纤通信及光纤传感器网络中等特点。掺 Yb^{3+} 光纤激光器的调谐范围可达 125nm，掺 Tm^{3+} 光纤激光器的调谐范围可超过 300nm，Q 调制 Nd^{3+} 光纤激光器的峰值功率达到百瓦量级。

(9) 色心激光器

色心激光器是一种近红外区可调谐固体激光器，目前其工作波长在 0.8～4.0μm 范围内。这种激光器的工作物质是色心晶体，所谓色心晶体就是掺入 Li、Na、K、Tl 或 OH^- 的碱金属卤化物。这些晶体包含着不同的色心，比如有 F_A (11)、F_B (11)、F_2^+、

$(F_2^+)^*$、$(F_2^+)_A$、$(F_2^+)_H$、N_2 等的能够形成激光振荡的色心。连续工作的 KF：F_2^+ 色心激光器的波长可调谐范围为 1.26～1.48μm，脉冲工作的 KCl：LiF_A（11）色心激光器的输出功率可达百瓦，波长调谐范围为 2.60～2.73μm，这些激光器目前只能在液氮温度下工作。但最近研制出以掺 OH^- 的 NaCl 晶体中形成的以 $(F_2^+)_H$ 为色心的色心激光器，即 NaCl：OH^- $(F_2^+)_H$ 色心激光器已在室温条件下实现了脉冲激光输出。

3. 液体激光器

（1）无机液体激光器

根据液体激光器的工作物质可分为无机液体激光器和有机液体激光器两大类。无机液体激光器的工作物质是掺有稀土离子的无机液体，例如在 Nd^{3+}：$POCl_3+SnCl_4+P_2O_3Cl_4$ 液体激光器中，$POCl_3$ 是溶剂，能使稀土离子在其中发光，另两种是助溶剂，以增加稀土盐的溶解能力，并使溶解物形成岛状结构，使稀土离子成为复合体的核，有效地防止稀土离子的能量损失。这种激光器的发射激光波长为 1.06μm。

（2）染料激光器

有机液体激光器的工作物质主要是溶于醇类、水和其他溶剂中的一些有机染料。从 1966 年用脉冲红宝石激光器泵浦氯化铝酞花青和花青类染料获得受激辐射以来，在 20 多年间，染料激光器得到了迅速的发展，并广泛应用于各个领域。染料激光器的最大优点是波长连续可调，目前已有数百种染料实现了受激辐射。染料激光器可产生从波长为 321nm 的近紫外到波长为 1.28nm 的近红外激光；染料激光器的另一个优点是增益很高。典型的染料激光器有脉冲染料激光器、连续波染料激光器、锁模染料激光器、同步泵浦锁模染料激光器等。

4. 自由电子激光器

自由电子激光器简写为 FFL，是一种可获得高质量激光束的、波长连续可调的新型强相干光源，目前已实现了从 40μm 远红外到 200nm 紫外光的激光输出。这种激光器与一般激光器不同，其工作物质是速度接近光束的电子束，它直接把高能电子 束的动能转变为激光能量。由于该系统中的电子不像在一般激光器中那样被束缚于原子或分子上，故得名为自由电子激光器。然而，正因为自由电子激光器与一般激光器有明显的差异，有些人不同意把它称为激光器，如同不能把微波电子管称为脉泽那样。但是，从它可产生相干光的观点来说，又确属激光器的一种。虽然其设备庞大，但它具有辐射激光波长范围广（从紫外到远红外）、谐振效率高、可获得大功率等特点。于是，目前人们正在积极开展理论和实验的研究工作。

5. 高温等离子体 X 射线激光器

X 射线激光的辐射可通过不同的途径实现。1981 年美国在内华达地下核试验场，用核爆炸激励的方法获得了 X 射线激光。用自由电子激光器、用高次倍频方法或用强电离高温等离子体方法也能获得 X 射线激光，目前最成熟的方法是用类氖硒离子电子碰撞激发来产生激光。但要想获得 2.33～4.37nm 波长的激光需要很高的驱动激光功率，以致难于实现。因此，人们把注意力放到双电子复合泵浦的类锂离子和类钠离子。目前，日本用类氦铝获得了波长为 4.2～4.6nm 的激光，法国、日本和我国先后获得了波长为 10.57nm 的类锂铝的激光放大；我国还得到类锂硅的 8.0nm 的激光跃迁。

2.3　半导体激光器

1. 半导体激光器的出现

20 世纪 50 年代末，虽然有几个人提出了利用半导体能够做出脉泽的想法，但 1961 年伯纳德和杜拉福格（Duraffourg）首先提出了关于半导体粒子数反转条件的定量分析。作为半导体材料他们提出了 GaAs 和 GaSb。凯斯（Keyes）和惠斯特（Quist）在 1962 年 7 月召开的 Solid State Device Research Conference（简称 DRC）会议上做了在砷化镓（GaAs）PN 结中可得到效率几乎为 100%的发光的报告，这一报告对半导体激光器的研究发展起了非常重要的作用。最初研制出半导体激光器的科学家之一的霍尔，当时虽然知道伯纳德等人的想法，但是他在没听这个报告以前，一直对半导体激光器持怀疑态度，认为在半导体中自由载流子的吸收强，发光光谱很宽，发光效率低，很难做出激光器，听了这个报告后才解除了这种怀疑，后来他成了半导体激光器研究的成功者。

IBM 的兰德尔（Landauer）、莱塞（Lasher）和杜姆科（Dumke）等人也是制作半导体激光器的成功者，虽然当初他们也想到了半导体激光器，但在 DRC 会议之前他们没有进行认真的研究工作。自从在 1962 年 7 月的 DRC 会议上听到 GaAs 二极管的高效率发光的报告之后，他们便开始了认真地对其进行研究。在此以前，他们想到为了实现半导体激光器，首先需要波模导向，其次为半导体材料必须是直接跃迁型。1962 年 3 月在梅博格（Mayburg）访问 IBM 时，向研究小组的人们谈了在 77K 下 GaAs 二极管的高效率发光问题，但他们在听到 DRC 的报告之前，没有对此给予重视。同年同月，梅博格在美国物理学会上也做了同样的报告，但仍没有引起人们的注意。然而，潘科夫（Pankove）和马索

罗利（Massoulié）的报告与凯斯、梅博格的报告激起了人们对半导体激光器的兴趣。尤其是7月份DRC会议上关于半导体发光效率及激光器的激烈讨论引起了与会者的极大兴趣。这次会议激起了人们研究半导体激光器的热情。霍伦亚科（Holonyak）从这次会议回来之后，马上开始了半导体激光器的研究工作。为了形成反馈，他想出了外加谐振腔的方法，而同一研究所的霍尔则提出了利用晶体解离面作为腔体的方案。这样，当年9月首次观察到了谱线明显变窄的现象，10月就公开发表了。

IBM的内森等人，在腐蚀成台面型的GaAs二极管中发现了谱线变窄现象。当时霍尔解释到，这是因为有可能这种二极管偶然形成了谐振腔所致。霍伦亚科根据霍尔的建议，用晶体解离面作为谐振腔，在GaAsP中成功地实现了受激辐射，并于10月公开发表。

发现高效GaAs二极管发光的林肯实验室的惠斯特等人同年11月实验成功了半导体激光振荡，并在1963年的DRC会议上发表了很多有关半导体激光器的研究报告，其中有关于半导体激光材料InAs、InP、GaInAs的研究报告，也有关于辐射效率和激光器阈值的研究报告。人们从1964年到1966年期间在InPAs及其他新材料中观测到了激光振荡，其中也包括Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体材料。

当时研制出的半导体激光器都是利用同种物质PN结的同质结激光器。因此，在室温下的阈值电流密度都非常大，其值大于50kA/cm^2。几乎所有的半导体激光器的研究都是在77K或在更低的温度下进行的。

1967年由迪门特（Dyment）等最先采用了条形结构，把电流限制在很窄的条形区，减少发热，实现了在205K下的连续激光振荡。在后来实用化的所有异质结结构激光器中都采用了这种条形

结构或其变形结构。

2. 半导体异质结激光器时代

因为同质结激光器的阈值电流密度降不下来，难以实现室温连续振荡。于是，到了 1965 年，曾一度如此活跃的半导体激光器的研究热开始沉默下来。1963 年克罗姆（Krömе）虽然发表了有关双异质结的论文，但没有引起人们的多大注意。他在论文中提出由两个 GaAs 层夹 Ge 组成双异质结的方案，认为用这种结构，即使在间接跃迁型的 Ge 材料中也有希望获得高效的发光。同一年，阿尔费罗夫（Alferov）申请了组合 GaAs 和 GaAsP 而成的激光器专利，并对这种结构的异质结激光器进行了实际的研究，但因为这两种材料的晶格常数不匹配，而未能得到优质的异质结。

1967 年 6 月 IBM 的伍德尔等人用液相外延生长方法，在 GaAs 衬底上成功地生长了 $Al_xGa_{1-x}As$ 固溶体材料。液相外延生长方法是早在 1963 年由 RCA 的纳尔逊（Nelson）发明的，图 4.2-2 给出了其原理。众所周知，这种方法后来被广泛地应用于半导体激光器的制作中，并成为制造半导体激光器的主要方法。这种方法所用的设备比较简单，重复性好，可以生长出具有高量子效率的优质单晶，现在很多的半导体激光器仍然用这种方法来制造。

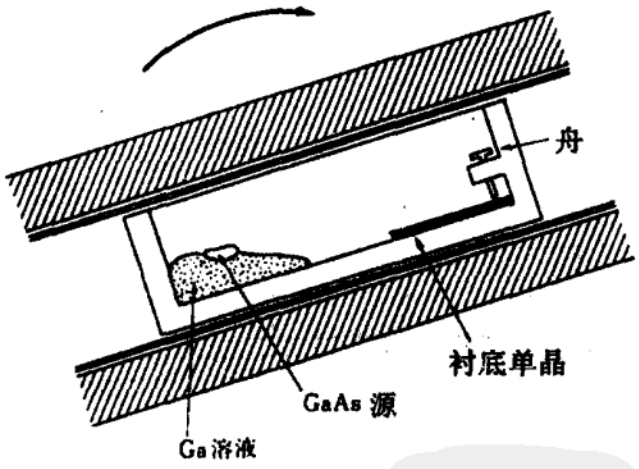


图 4.2-2　1963 年纳尔逊发明的液相外延原理图

雅波莱茨(Rupprecht)等人在1967年召开的第一次半导体激光器会议上，做了关于从GaAlAs发光二极管到GaAlAs激光器的发展过程的报告。在这之前，他们还发表了由于AlAs和GaAs晶格匹配好可以获得优质外延单晶的论文。参加这个会议的潘尼斯等人受到Rupprecht的影响，开始了GaAlAs液相外延的研究工作，但他们并没有得到制造低阈值激光器的预想结果。

1967年末林严雄在研究AlGaAs层的光荧光时，发现了异常现象。即在某种条件下，作为AlGaAs外延衬底的GaAs中观测到了很强的光荧光。这是一个完全没有预想到的发现。通过总结所得到的实验结果，他马上意识到这肯定是由于形成了优质的GaAs/AlGaAs异质结的结果。由此得出如果能制备出优质的异质结，就可以改善半导体激光器性能的结论。于是，这一想法就成了开始进行异质结激光器研究的动机。

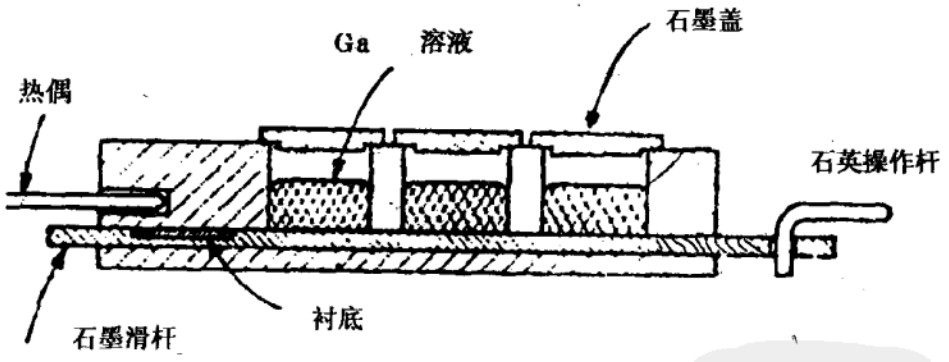


图 4.2-3

当时谁也没有想到能够做出这样好的异质结。因为在这以前所知道的异质结中都存在着很多的界面态缺陷，所以人们普遍认为异质结是一种质量非常差的非理想结构。当时，已经测出各种半导体材料的晶格常数，并知道GaAs和AlGaAs、GaAs和Ge的晶格常数非常接近的事实。然而，事实上只有晶格常数相接近，不一定就能做出高质量的异质结。另外，所用异质结制备方法的不

同，其结果也完全不同。用连续液相外延生长方法在GaAs衬底上生长出高质量的AlGaAs异质结，这是在半导体异质结激光器的发展史上非常重要的一个发明。后来在半导体激光器中得到广泛应用的优质异质结的界面缺陷密度甚至少于Si/SiO_2界面缺陷，可以推测界面缺陷减少到悬空键的百万分之一左右。人类发明了能制备这么高质量异质结的如此简单的工艺方法实在是一个非常幸运的事情。勤劳勇敢的人类总会得到好运！

经过两年多的努力，实现了室温连续振荡的半导体激光器。1968年秋在AlGaAs/GaAs单异质结激光器中得到了可大幅度降低室温阈值的结果。用同质结制作的激光器的最小室温阈值电流密度为60～100kA/cm^2，而用液相外延法生长P^+层制作的外延型激光器的阈值为30～40kA/cm^2。采用单异质结结构后室温阈值很快降到20kA/cm^2，到1968年末降到了10kA/cm^2。随着研究工作的深入，人们逐渐认识到单异质结结构的局限性，为了克服它的局限性，提出了在N型层的另一边再设置一个异质结势垒的想法，这就是1968年末提出的双异质结结构。然而，原苏联的阿尔费罗夫早已开始了双异质结的研究工作。

看来，采用双异质结是实现半导体激光室温连续振荡的必要条件。但问题在于如何制备双异质结。单异质结是根据RCA的Nelson的浸泡液相外延方法，在GaAs衬底上只外延生长一层AlGaAs就可以了，但是制备双异质结并不那么简单，为了生长双异质结，先在GaAs衬底上外延生长一层AlGaAs后，在这AlGaAs层上需要外延GaAs层，然后在GaAs上面再外延生长另一层AlGaAs，这样，至少要进行三次外延生长，这就增加了外延生长的难度。直到潘尼斯等人研究出滑动舟连续外延生长法之后才进一步推进了双异质结激光器的研究工作。经过艰苦的努力，把室温阈值从10kA/cm^2降到2～3kA/cm^2，1970年春成功地实现

了在 0℃ 以上温度下的连续振荡，同年 6 月 1 日实现了半导体激光器的室温连续振荡，室温阈值电流密度降低到 1.6kA/cm^2。这种激光二极管在 38℃ 温度下还可连续振荡几个小时，足以测量其振荡光谱。同年 6 月末，在西雅图召开的 DRC 会议上发表了这一实验结果。1970 年原苏联的亚尔夫洛夫等人比他们早些时候研制出了室温连续振荡的半导体双异质结激光器。从此以后，半导体激光器进入了双异质结激光器时代。其典型结构示于图 4.2-4 中，图 4.2-5 是双异质结半导体激光器发射激光的示意图。

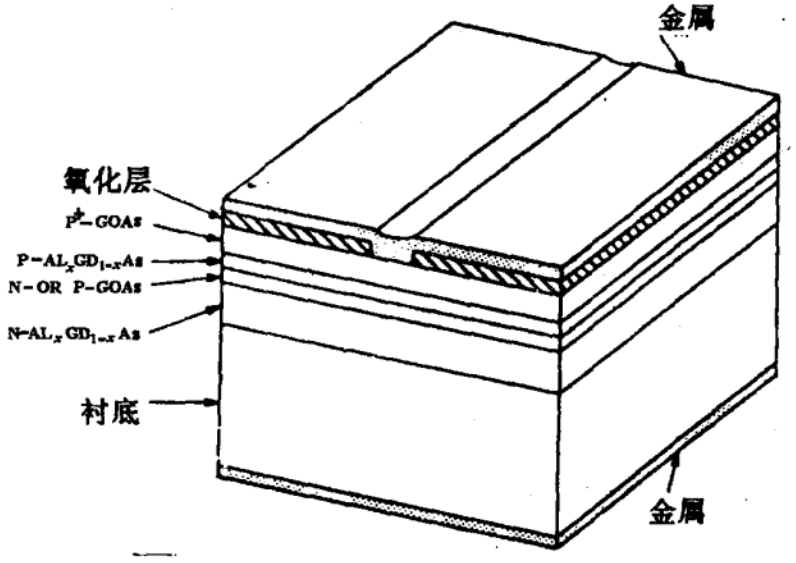


图 4.2-4 异质结半导体激光器基本结构

在实现半导体双异质结激光器实用化研究过程中，实际上遇到了预想不到的许多困难。比如，寿命问题、晶体质量及端面恶化、条形结构固有的模式变形等。经过 5 年多的时间，人们研制出了可用于光纤通信的半导体双异质结激光器。至于达到广泛用于民用产品水平，竟经历了 10 年的岁月。在此期间花费了很多研究工作者的心血，其主要工作是在日本进行的，并取得了卓越的

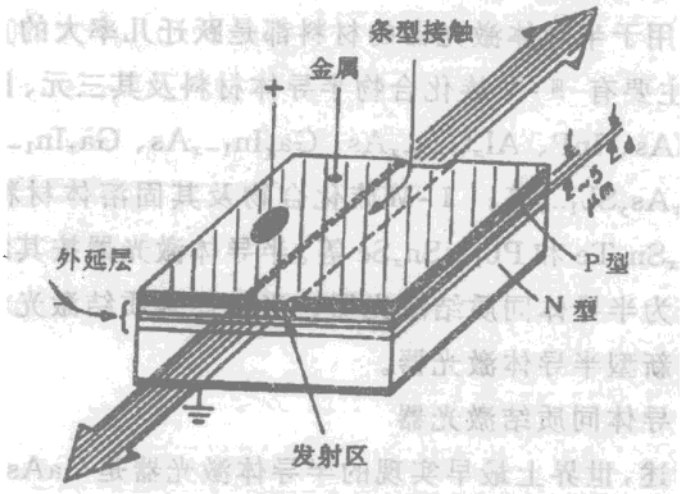


图 4.2-5　双异质结半导体激光器发射激光示意图

成果。人类在前进的道路上是没有克服不了的困难的，半导体激光器从诞生到实用化经历了 10 多年的时间，如果没有它，不可能有现在的 CD、VCD，也不可能想象把一本百科全书记录在一个小小的光盘上。

半导体激光器的发射波长范围很广。AlGaAs 激光器的发射波长在 810～870nm 范围内，可见光 AlGaAs 激光器的发射波长为 715～760nm，InGaAsP 系激光器的发射波长为 1 000～1 700 nm。

半导体激光器的发射波长决定于半导体材料的禁带宽度。禁带宽度越小发射波长越长。通过改变三元、四元系固溶体中的组分比可以改变材料的禁带宽度，亦即可以改变激光波长。半导体激光器系列可提供的激光波长范围很广，大致覆盖从 0.33μm 到 48μm。一般把比 GaAs 激光器波长长的激光器称为长波长半导体激光器，反之称为短波长半导体激光器。

3. 半导体激光器的分类

目前，用于半导体激光器的材料都是跃迁几率大的直接跃迁型半导体，主要有 Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体材料及其三元、四元固溶体材料：GaAs、InP、$Al_xGa_{1-x}As$、$Ga_xIn_{1-x}As$、$Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}$和 $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$等；Ⅰ-Ⅵ族化合物及其固溶体材料：PbS、PbTe、$Pb_{1-x}Sn_xTe$ 和 $Pb_{1-x}Sn_xSe$ 等。半导体激光器按其结构的不同大致可分为半导体同质结激光器、半导体异质结激光器及最近发展起来的新型半导体激光器。

（1）半导体同质结激光器

如前所述，世界上最早实现的半导体激光器是 GaAs 同质 PN 结激光器。在 N 型 GaAs 衬底上，用外延生长 P 型 GaAs 层或在 P 型 GaAs 衬底上外延生长 N 型 GaAs 层而形成 GaAs 同质结 PN 结。这种同质结 GaAs 激光器的激光波长为 0.85μm。这种激光器的阈值电流密度很高，在室温下阈值为 30～50kA/cm²，因此，很难制成室温连续工作的激光器，一般在脉冲条件下工作。

（2）半导体异质结激光器

半导体异质结激光器又分为单异质结（SH）激光器和双异质结（DH）激光器。

在 P 型 GaAs 衬底上生长 x 为 0.3 的 N 型 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 而形成的单异质结宽面激光器是在室温脉冲下工作的激光器，其输出激光波长约为 0.9μm，阈值电流密度为 15kA/cm²，单面输出功率为 6～9 毫瓦。

半导体双异质结激光器是为了实现室温连续振荡，于 1970 年研制出并经过 10 年的艰苦努力而实用化的目前普遍使用的半导体激光器。这种激光器是在 N 型 GaAs 衬底上依次生长 N 型 $Al_xGa_{1-x}As$、P 型 GaAs 和 P 型 $Al_xGa_{1-x}As$ 形成两个异质结而制成的，故称双异质结激光器。它的激光波长决定于 x 值，当 $x=0.3$

时，其输出波长为 0.8～0.9μm，阈值电流密度小于 3kA/cm²，单面输出功率为 10～70 毫瓦。

目前用于光纤通信的半导体双异质结激光器是由四元半导体固溶体 $In_{1-x}Ga_xP_{1-y}As_y$ 制成的，它的激光波长决定于 x 和 y 的值，常用的波长为 1.1～1.5μm。

半导体双异质结的种类还很多，这里就不一一介绍了。

(3) 新型半导体激光器

半导体双异质结激光器的室温阈值电流已降低很多了，并得到了广泛应用。然而为了进一步降低其阈值，适应更广泛的需求，人们仍在不断地进行着新型半导体激光器的开发和研究工作。目前已研究开发出的新型激光器有量子阱激光器、面发射激光器、大功率半导体激光器、新波段半导体激光器、单频窄谱线半导体激光器等。

半导体量子阱激光器的结构基本上与一般半导体双异质结激光器相同，只是把激光器的有源层厚度减小到数十纳米，使其具有量子尺寸效应。量子阱激光器有单量子阱激光器、多量子阱激光器、应变量子阱激光器、量子线激光器及量子箱激光器等多种。量子阱激光器把量子尺寸效应巧妙地用于激光器中，大大改善了激光器的特性，并已把激光器的阈值电流密度降低到了 250 A/cm²。

大功率半导体激光器是目前国际上的热门研究课题之一。这种激光器主要用于固体激光器的光泵浦源、高速光记录、高速光印刷、单模及多模数据分配系统、水下光缆传输局部通信网络及激光雷达等领域。

目前，单个大功率半导体激光器可获得的最高输出功率已达到瓦级数量级，而量子阱结构锁相列阵激光器可得到的脉冲输出功率为 60 瓦，相叠五层可得到 300 瓦的输出功率。

第三章 半导体发光二极管

固体发光可分为本征场致发光和注入场致发光两大类。半导体发光二极管（LED）和半导体激光二极管（LD）都是属于注入式场致发光器件。只不过前者是自发辐射发光，而后者是受激辐射发光。发光二极管是广泛用于各种信息显示、仪器仪表、家用电器等各个领域的重要的光电子器件。

3.1 历史的回顾

自从1920年发表戈登-泡尔（Gudden-Pohl）效应之后，人们对半导体发光发生了兴趣。人们把于1923年在点接触碳化硅（SiC）二极管中首次观察到发光现象的O. W. 罗西（Lossev）说成是发光二极管的创始人。他所观察到的发光现象不是本征场致发光，而是通以普通直流电流时发出的注入式发光，可能是因为他第一个发现了注入式发光现象，所以被称为是LED的创始人。但是，因为当时这种材料的生长非常困难，而且加工难度也非常大，于是从那以后，几乎没有看到有什么研究进展。1935年发现了Dechene效应，1936年实现了ZnS的本征场致发光；到了1940年提出了碳化硅（SiC）PN结发光的可能性；1951年研究出SiC PN结发光二极管；1952年J. R. 海尼斯（Haynes）和H. B. 伯瑞克斯（Briggs）发现了真正按半导体工艺技术制备的单晶锗和硅PN结的发光二极管；同年由威尔科（H. Welker）提出把Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体用于半导体发光器件的想法。从此，人们对几乎透明的、吸收边在绿色可见光附近的GaP材料产生了极大的兴趣，1954年制备出GaP单晶并测定了其半导体性质。1955年英国的沃尔夫等人在点接触GaP单晶中，首次观察到了橙色可见光发

光。以此为开端，很多的研究工作者投身于半导体发光器件的研究开发中，陆续发表了很多有关固体发光器件的论文；1957 年美国的霍伦亚科发明了红色 GaAsP 发光二极管；经过 10 年的努力，于 1968 年实现了 GaAsP 发光二极管的产业化；1960 年终于研制出 GaP 发光二极管；1969 年实现了 GaP 红色和绿色发光二极管的实用化。

后来，随着半导体材料生长技术和制备 PN 结工艺技术的发展和成熟，相续研制出各种性能优越的发光二极管，如超高亮度红色 GaAlAs、橙色 AlGaInP、蓝色 GaInN 发光二极管等。目前已实现了红、橙、黄、绿、蓝等各种颜色的发光二极管的商品化。随着发光二极管的高亮度、全色化的发展，其应用领域也越来越大，日趋占据固体显示器件中的主导地位。表 4.3-1 给出了各种发光二极管的特性。

表 4.3-1　发光二极管特性

材　料		发光颜色	发光波长	最高外量	发光效率
发光层	衬底		(nm)	子效率（%）	(lm/W)
GaP (Zn.O)	GaP	红色	700	15	3.0
$Al_{0.35}Ga_{0.65}As$	GaAs	红色	660	7	2.1
$Al_{0.35}Ga_{0.65}As$	AlGaAs	红色	660	21	12
$GaAs_{0.6}P_{0.4}$	GaAs	红色	650	0.2	0.35
$GaAs_{0.45}P_{0.55}$ (N)	GaP	红色	650	0.5	0.25
$GaAs_{0.35}P_{0.65}$ (N)	GaP	橙色	630	0.65	1.2
$GaAs_{0.25}P_{0.75}$ (N)	GaP	橙色	610	0.6	2
InGaAlP	GaAs	橙色	620		
$GaAs_{0.15}P_{0.85}$ (N)	GaP	黄色	590	0.25	1.1
$GaAs_{0.1}P_{0.9}$ (N)	GaP	黄色	583	0.2	1.1
GaP (N)	GaP	黄绿色	570	0.7	4.3
GaP (N)	GaP	黄绿色	560	0.3	1.6
CaP	GaP	绿色	550	0.2	1.36

续表 4.3-1

材料		发光颜色	发光波长 (nm)	最高外量子效率（%）	发光效率 (lm/W)
发光层	衬底				
GaN	α-Al_2O_3	蓝色	490	0.1	0.14
SiC	SiC	蓝色	480	0.12	0.04
ZnSe	ZnSe	蓝色	480	0.03	——
ZnSe	ZnS	蓝色	460	0.01	——
InGaN	Al_2O_3	蓝色	450	2.7	——

除了可见光半导体发光二极管外，还有以信号传输为主要目的的近红外半导体发光二极管，这种发光二极管还可用作电视摇控器、录相和光盘自动控制、相机自动聚焦、FA 的光电开关以及光纤通信的光源等。

3.2 红外发光二极管

由于发光二极管的发射光子能量小于发光二极管用半导体材料的禁带宽度，因此为了接受发光二极管传输的信号，发光二极管的发射波长必须与作为接受器用的硅光电器件的响应波长相一致，GaAs 发光二极管可满足这个要求。GaAs 是属于直接跃迁型的半导体材料，它的发光效率高，而且能够制备出优质的单晶。因此，人们首先对 GaAs 红外发光二极管进行了研究，而后研究了以 GaAs 为基础的直接跃迁型三元固溶体半导体材料的红外发光二极管。以这种想法为基础，人们研究出了利用 Si 在 GaAs 中起双重杂质作用，一次外延生长形成 PN 结的方法。用这种方法制作的掺硅 GaAs 发光二极管，其发射波长为 940nm，最高外量子效率为 16%；在掺锌 GaAs 外延层上，用扩散方法制作的 GaAs 发光二极管的发光波长为 900nm，最高量子效率为 3%。在 GaAs 衬底上外延生长掺 Si 的 $Ga_{0.65}Al_{0.35}As$ 外延层形成单异质结结构，可制作单异质结红外发光二极管，它的发光波长为 880nm，最高外量子

效率可高达 20%；以 GaAs 为衬底，$Al_{0.03}Ga_{0.97}As$ 为外延层的双异质结发光二极管的发光波长为 850nm，平均外量子效率为 3%；以 InP 为衬底、$In_{0.76}Ga_{0.24}As_{0.55}P_{0.45}$ 为外延层的双异质结发光二极管的发光波长为 1 300nm，平均外量子效率为 1%～2%。

红外光开关广泛地应用于各种家用电器中，大家熟知的电视摇控器就是应用红外发光二极管的最典型的例子。用它不仅可控制频道的变换，还可调整音量、亮度和对比度以及电源开关等。这种红外摇控器就是由红外发光二极管和红外光探测器组成的。

3.3　可见光发光二极管

发光二极管是在半导体 PN 结中通正向电流时发出光的器件。发光二极管发出的光波长即颜色决定于制作发光二极管用的半导体材料的禁带宽度。导带电子和价带空穴复合而发出的光的波长 λ 与半导体材料的禁带宽度 E_g 之间有如下关系

$$\lambda(\mu m) = \frac{1.24}{E_g(eV)}$$

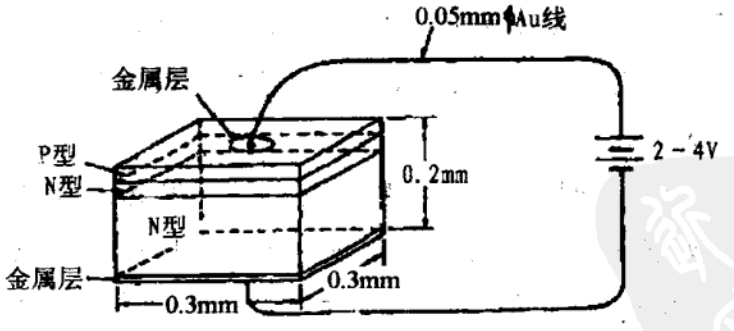


图 4.3-1　发光二极管基本结构

用人的肉眼能看得见的可见光波长范围为 380～780nm 之

间。可见光发光二极管用半导体材料的禁带宽度 E_g 应大于 1.78eV。显然，E_g 是选择可见光发光二极管材料时应考虑的基本参数之一，除了考虑发光波长之外，在制备发光二极管时，还必须考虑其发光效率。影响发光效率的因素有电注入效率、复合发光效率及光学效率。通常把电注入效率和复合发光效率的乘积称为内量子效率，把三种效率的乘积称为发光二极管的外量子效率，它是用发光二极管的注入电荷数和从发光二极管中引出到外部的光子数之比来表示的。

对于像 GaAs 这一类直接跃迁型半导体来说，直接复合起主导作用，因此内量子效率比较高，接近 100%；但由于自吸收，从晶体内实际能取出的光子数却比较少。为了使半导体发光二极管具有实际应用价值，不但要选择内量子效率高的材料，并且要采取适当措施，以提高外量子效率。如将晶体表面做成球面，并使发光区处于球中心位置，这样可避免表面的全反射。

GaAs 发光二极管的发光效率比较高，而且 GaAs 单晶的制备技术比其他化合物半导体材料成熟，容易得到优质的单晶材料。然而，GaAs 的禁带宽度 $E_g=1.43$eV，相应的发光波长为 $\lambda=900$nm 左右，是近红外光，如前所述，如果用掺硅砷化镓单晶制作发光二极管，它的发光波长为 940nm，这样就可以减少自吸收，明显提高发光的效率。

人们研究出了利用荧光体等物质把 GaAs 发光二极管发光的近红外光转变成红色或绿色可见光的技术，这种技术叫做上转换技术。荧光体是含有稀土金属 Yb 和 Er 离子的 LaF_3。红外光转换成可见光的机理大体上是这样的，镱离子（Yb^{+3}）吸收 0.9～1μm 的红外光，而铒离子（Er^{+3}）则从 Yb^{+3} 离子两次获得能量而跃迁到更高的能级上，然后高能态的电子降落时便发出绿光。利用适当的母体单晶和稀土金属离子的配比，还可以把近红外光转换成

红、黄、蓝等可见光。转换效率较高的母体单晶有 LaF_3、YF_3、YOCl、Y_3OCl_7、Y_2O_2S 等，掺杂用稀土离子有 Y^{+3}、Er^{+3}、Tm^{+3} 等。但是，这种转换方法只有消耗更多的电能才能得到较高的发光效率。因为这种发光二极管的总发光效率等于近红外光的发光效率乘上荧光体的转换效率。这两个效率都小于 1，因此，会大大降低总的发光效率。

为了制作直接发射可见光的发光二极管，可利用Ⅲ-Ⅴ族三元固溶体半导体材料 GaAsP、AlGaAs 等。适当地选择其组分比，可以使这些材料既保持直接跃迁型能带结构，又可以使其禁带宽度变宽。比如 $GaAs_{1-x}P_x$ 材料，当选择组分 $x=0.4$ 时，发射波长为 650nm 的红光；当 $x=0.75$ 时，发射波长为 610nm 的橙光；当 $x=0.85$ 时，发出波长为 590nm 的黄光。20 世纪 70 年代末，日本的西泽润一把温差法液相外延技术用于 GaAlAs 材料的外延生长上，并创造了连续液相外延技术，制备出了高质量的外延单晶，制作出最高外量子效率为 21%的红色 $Al_xGa_{1-x}As$ 发光二极管。对于这种材料，当 $x=0.35$ 时，发出波长为 660nm 的红光。在温差法液相外延技术基础上如果再利用蒸汽压控制技术可以大大改善化合物半导体的化学计量比，可获得完整性更好的单晶，并可进一步提高发光效率。这种技术还可用于 GaP、GaAs 等材料的液相外延生长上，从而可提高它们的晶体完整性。

20 世纪 70 年代已研究开发出了重要的发光材料 GaP，它是间接跃迁型材料，它的发光效率较低，但是人们已研究出了在 GaP 中掺入能够形成束缚激子的杂质，如 Zn-O 对、Cd-O 对或掺入能够形成等电子中心的杂质（如 N），这样就可以提高 GaP 的发光效率。波长为 700nm 的红色 GaP 发光二极管和波长为 560nm 的黄绿色 GaP 发光二极管就是用这种方法制作的，并已实现了商品化。在录音机、摄像机、电视机、照相机等家用电器或各种仪器

仪表中安装的小型红、绿色指示灯就是用的这种红、绿色 GaP 发光二极管。

除了目前常用的 GaAs、GaAlAs、GaAsP 和 GaP 等材料之外，人们还研究了 $In_{1-x}Ga_xP$ 和 $In_{1-x}Al_xP$ 等固溶体。因为它们具有比较宽的直接跃迁型禁带宽度，有可能制备出视感度非常高的绿色发光二极管。$In_{1-x}Ga_xP$ 材料在 $x=0.63\pm0.02$ 处有一个由直接跃迁型变为间接跃迁型的转折点，此处的 E_g 在室温下等于 2.17 ± 0.02eV。已研制出 $In_{1-x}Ga_xP$ 发光二极管，室温发光效率很低，但在 77K 低温下的发光效率为室温的 100 倍左右。

$In_{1-x}Al_xP$ 的性质与 $In_{1-x}Ga_xP$ 接近，但由于 AlP 的禁带宽度比 GaP 大，所以可获得更大的禁带宽度。但是，人们却遇到了制备这两种材料的诸多困难。液相生长时，因为 In 的分凝系数比 Ga 小，所以不容易得到均匀性好的单晶。另外，InP 和 GaP 的晶格常数差别较大，容易产生较多的失配位错，不利于制作高效发光二极管。

最近人们发现 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$ 四元固溶体与 GaAs 晶格匹配良好，并通过改变 Al 的组分 x，可以获得发射波长在 555～660nm 范围内的直接跃迁型禁带宽度。1990 年菅原利用有机金属化学气相淀积 (MOCVD) 技术，成功地生长出高质量的 InGaAlP 外延膜，并研制出双异质结 InGaAlP 发光二极管。其发射波长为 620nm (橙色)，发光效率为 GaAsP 发光二极管的 5 倍，封装后的法线光强为 3 烛光，达到了超高亮度 GaAlAs 红色发光二极管的水平。最近又研制出波长为 590nm、法线光强为 8 烛光的黄绿色和波长更短、光强为 1.5 烛光的绿色 InGaAlP 双异质结发光二极管。这种材料作为可见光激光器材料也引起了人们的注意。

蓝色是色三要素——红、绿、蓝中不可缺少的一种颜色。各国正积极开展蓝色发光二极管的研究工作。禁带宽度在 2.6eV 以

上的半导体材料都有希望做出蓝色发光二极管。然而，禁带宽度越大的材料，其制备就越困难。一般来说，它们的熔点比较高，并且由于自补偿效应，使得这些材料不易同时做出N型和P型材料以及不易控制作为发光中心的杂质。

可制作蓝色发光二极管的宽禁带半导体材料有SiC、GaN和ZnSe等。

由于生长温度和条件的不同，SiC有80多种同素异构体。在1 400℃温度以下形成2H型，在1 400～1 600℃温度时形成3C型，在1 600～2 100℃温度下主要形成4H型，在2 100℃以上温度时，主要形成6H型，但在杂质超过0.1%以上条件下，则形成其他结构的SiC。

近年来在6H型SiC衬底上，从碳饱和的硅熔体中，在1 000℃温度下，成功地进行了6H结构的SiC外延层的生长实验，并制备出优质SiC外延单晶。用这种方法制备SiC单晶的关键在于所用的衬底是否是优质的6H型SiC。因为在生长SiC晶体时很容易形成同素异构体，比如6H型常和15R型共存。6H型SiC的禁带宽度E_g=3.04eV，虽然它属于间接跃迁型材料，但可以同时做成P型和N型，掺氮可形成N型，掺铝可形成P型，而氮和铝在SiC中可形成有效的发光中心，并用这种PN结已经制作出了SiC蓝色发光二极管，其发光波长为470nm，发光强度为12mcd，工作电压为4伏（20mA）。提高SiC发光二极管的关键在于找出如同在GaP中N那样起有效发光中心作用的等电子陷阱。

在Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体中，GaN的禁带宽度比较大，E_g=3.39eV，作为制作蓝色发光二极管的半导体材料，它吸引了人们的注意力。从20世纪70年代到80年代，人们对它进行了认真的研究。然而，它与大多数Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体材料很类似，由于自补偿效应，很难得到低阻的P型，只能做出金属-绝缘体-半导体

(MIS) 结构的蓝色发光器件。它的最高发光效率只有 0.1%，而且在 10mA 电流下其工作电压高达 10 伏。生长 GaN 单晶用的蓝宝石 (Al_2O_3) 与 GaN 的晶格常数和热膨胀系数差别太大；很难制备出优质的 GaN 单晶。于是，一段时期 GaN 的研究热降了下来，不少人转移了其研究方向。正在这时，日本日亚化学工业公司的中村修二仍坚持 GaN 的研究工作，经过坚持不懈的努力，于 1993 年终于研制出了超高亮度 GaN 基双异质结蓝色发光二极管。其发射波长为 450nm 的纯蓝色光，光强超过 1 000mcd，为原 GaN 蓝光强度的 100 倍，从而发光二极管全色显示的希望变成了现实，打破了 GaN 研究工作的沉默，重新掀起了研究 GaN 的热潮。下面简单回顾其研究和开发过程。

为了实现 PN 结发光二极管，必须生长出缺陷少的 P 型 GaN 单晶薄膜材料。他们利用 MOCVD 法，首先在蓝宝石 Al_2O_3 单晶衬底上，低温 (500～600°C) 生长 GaN 缓冲层，然后在 1 000°C 生长温度下在其上面生长 GaN 单晶，终于在 1990 年成功地生长出了高质量的 GaN 单晶膜。

一般地说，在 1 000°C 的高温下，GaN 容易分解而形成 N 空位。另外，GaN 和衬底的晶格失配度很大，为 15.4%，利用通常的 MOVPE (有机金属气相外延生长) 法很难生长出优质单晶膜。因此，中村等人开发出所谓“TWO-FLOW MOVPE 法”的新的生长装置。即为了控制 GaN 生长中产生的热对流现象，采用了从上面压住反应气体流 (主流量) 的补助气流 (副气流)。反应气体流由三甲基镓、NH_3 和 H_2 组成，副气流则由 N_2 和 H_2 组成。用这种方法，生长出了位错少、迁移率高的 GaN 单晶膜。

他们制备出优质 GaN 单晶膜之后，开始了 P 型 GaN 膜的制备方法。1989 年，由名古屋大学的赤崎勇教授担纲的研究小组，采用掺 Mg 的 GaN 中照射电子束的方法，首次制备出低阻 P 型

GaN 材料。因此，中村等人坚信低阻 P 型 GaN 的制备不是不可能的。他们研究出了在 N 气中热处理制备低阻 P 型 GaN 的方法。用这种方法，制备出了比照射电子束方法质量更好、更均匀的低阻 P 型 GaN 单晶膜。1993 年，他们为了提高发光效率和视感度，利用上述的 GaN 晶体生长技术，确立了 InGaN 和 AlGaN 晶体生长技术，并实现了以掺锌 InGaN 为发光层的 InGaN/AlGaN 双异质结发光二极管。InGaN 为 GaN 和 InN 的固溶体，AlGaN 为 GaN 和 AlN 的固溶体，它们是一种禁带宽度变化范围很宽的发光层和限制层材料。

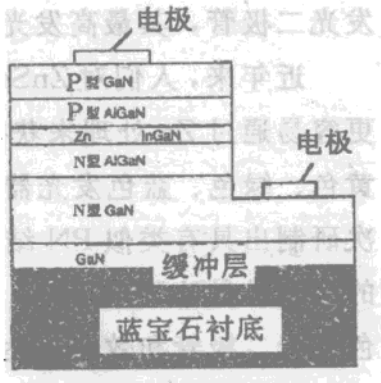


图 4.3-2　高亮度蓝色发光二极管基本结构

用这种结构研制成的发光二极管的峰值波长为 450nm，半宽度为 70nm，当正向电流为 20mA 时，发光输出功率为 1.5mW 左右，外量子效率为 2.7%，寿命可达数万小时，工作电压小于 4 伏，已完全达到了实用化水平。

用这种结构已研制出波长为 540nm 的绿色发光二极管，这种材料又是制作蓝色激光器的极有希望的材料，人们期待着实现半导体蓝色激光器的那一天。

Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体是又一种重要的制作蓝色发光器件的半导体材料。目前，研究得比较多的典型的Ⅱ-Ⅵ族材料为 ZnS 和 ZnSe。

ZnS 材料可以用高压熔融法比较容易地制备出较大的单晶，成本也较低，但其电学性质比 GaN 还难以控制。在熔融的 Zn-Al 中经过热处理可以得到 N 型低阻硫化锌，但还不能做出均匀性好的本征层。虽然如此，人们现在已用 MIS 结构研制出了 ZnS 蓝色

发光二极管，其最高发光效率达到 0.01%。

近年来，人们对 ZnSe 和 ZnSSe 材料研究得较多。它们比 ZnS 更容易通过 Zn 处理来获得 N 型低阻晶体，已研制出了 MIS 结构黄色、绿色、蓝色发光器件。同时，还采用离子注入 Li 和 P，首次研制出具有类似 PN 结型的发光器件。更鼓舞人心的是用通常的杂质扩散法形成了 PN 结，并制作出效率为 0.03%的 ZnSe 蓝色发光二极管和效率高达 1～5%的 ZnSSe 白色发光二极管。自从 1991 年美国首先研制出 Ⅱ-Ⅵ族半导体蓝光激光器和高输出功率的蓝色发光二极管以来，对 Ⅱ-Ⅵ族半导体材料的研究工作更加活跃起来了。

总的来看，蓝色发光二极管的实用化，不仅解决了发光二极管显示的色三要素问题，而且对于进一步提高红色和绿色发光二极管的发光效率，将提供很有价值的科学论据。

第四章 其他光电子器件

4.1 光电探测器

人的眼睛能看得见的可见光波长范围为 0.38～0.78μm，能够检测可见光的光电导型光电探测器材料很多，主要有 CdS、CdSe、Se 及 Si 等半导体材料。

检测红外光的半导体光电器件，一般使用与红外光波长相适应的禁带宽度较小的半导体材料或者利用具有杂质光电导效应的掺杂半导体材料制备。由于红外探测用半导体的禁带宽度 E_g 和施主杂质能级 E_D 及受主杂质能级 E_A 都很小，所以红外光电器件的工作温度较低，多数在低温下工作。除近红外光电器件可以在室温下工作外，中红外的 InSb、CdHgTe 等半导体光电器件则需要

在液氮温度 77K 下工作。

利用光生伏特效应的光二极管、光雪崩二极管、光晶体管等光电器件的共同特点与上述的光电导型器件不同，在器件结构上必须有 PN 结、异质结或肖特基结。因此，目前主要用能够形成双极性的元素半导体 Ge、Si 及以 GaAs 为代表的多元素Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体材料制作各种光生伏特型光电器件。比如，已商品化的光生伏特型光电器件有检测波长范围为 0.2～1.5μm 的 GaAs、0.2～20μm 的 Ge、0.2～4μm 的 Si 以及在低温 77K 工作的检测波长为 0.75～3.5μm 的 InAs 和 0.77～5.5μm 的 InSb 等红外探测器，目前人们还积极进行着各种半导体异质结和超晶格结构的光生伏特型光探测器的研究开发工作。

光生伏特型光探测器比光电导型光探测器具有灵敏度高、响应速度快、暗电流小、噪声低等优点。因此，在同一波长范围内，经常使用光生伏特型光探测器，而不使用光电导型。

在早期制作光电二极管时，多半用 Ge 材料制备合金型的光电二极管，但是这种二极管由于暗电流和噪声大等原因，现在除了极特殊的情况以外，一般都使用用硅制作的扩散型光电二极管。

现在分立光探测器的技术研究趋向是向高灵敏度、高速响应、宽波长带发展，这与光通信接收装置中光探测器的要求相吻合。不用说发光二极管，就连半导体激光器的输出光谱，严格地说，也具有不相干的性质，因此，要进行外差法相位检波就很困难，但是，利用光生伏特型普通光检波器进行包络线检波时，即使光谱有变动，也可以正确取出调制的电信号。由于这种光检波器是把与电压的二次方成比例的电功率变换成信号电压，所以称为二次方检波。作为这种光探测器的有半导体 PIN 光电二极管（PD）和雪崩光电二极管（APD）。

PIN 光电二极管是由强 P（P^+）型、本征（I）型和强 N

(N^+) 型半导体构成的，简写成 PIN 光电二极管。当从 P^+ 区入射光时，所产生的电子-空穴对各向正负电极输运而形成光电流。为了提高响应速度，在 PIN 光电二极管中施加反向偏压，但不产生雪崩放大现象。虽然没有电流放大作用，但具有噪声小的优点。

雪崩光电二极管的结构为 N^+P、NP^+ 或 N^+PP^+ 型。在 N^+PP^+ 结构的雪崩光电二极管中，从 P^+ 层入射光而形成电子-空穴对，当 PN 结施加反向偏压时，在 P^+ 区或形成耗尽层的 P 区中产生的载流子漂移到不同的电极而形成电流，当反向偏压加大到引起雪崩击穿时，光电流急剧增加而起放大电流的作用。一般光电流的放大倍数为 30～10 000 左右。

在雪崩放大过程中，随着光电流的放大，也产生过剩的噪音。过剩噪音指数 F 与电子的电离率 α 和空穴的电离率 β 之比 k 有关，$k=\alpha/\beta$（<1）越小，F 越小，即噪音也越小。

在 0.8～0.9μm 的波段中，使用 Si-PIN 光电二极管或 APD 光电二极管。PIN 光电二极管的量子效率为 90%，静电容为 5pF，APD 的量子效率为 50%，静电容为 1～3pF。

另外，在波长为 1～1.7μm 波段中，使用比 Si 禁带宽度小的 Ge、$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$、$Hg_xCd_{1-x}Te$、$Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$ 等材料制作的 PIN 和 APD 光电二极管。表 4.4-1 给出了各种长波长光探测器的材料。

表 4.4-1 长波长光探测器材料

材料	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$/InP	$Ga_{0.47}In_{0.53}As$/InP	$Ga_{0.27}In_{0.73}As_{0.40}P_{0.60}$/InP	$Hg_{0.3}Cd_{0.7}Te$	$Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$/GaSb	Ge	Si
禁带宽度 E_g(eV)	1.35～0.75	0.75	0.95	0.92	1.24～0.73	0.72	1.1
波长 λ(μm)	0.92～1.67	1.67	1.30	1.35	1.0～1.7	1.7	1.1
暗电流 I_d(nA)(面积 $4\times10^3\mu m^2$)	10^{-2}～4×10^{-1}	10^{-1}	10^{-2}	60	10^2	10	10^{-4}
电离率 $R(\beta/\alpha$ 或 $\alpha/\beta)$	0.2～0.3	0.25	0.25	$\beta>\alpha$ 0.03	$\beta>\alpha$ 0.03～0.5	$\beta>\alpha$ 0.5	0.02
灵敏度(A/W)	0.6～0.8	0.8	0.6	0.6	(0.6)	0.85	
衬底熔点(℃)	1070	1070	1070		712	958	1412

4.2 光电集成器件

可以预见，在高速传送和并行处理上具有优势的光技术和适应信息放大和开关功能的电子技术将会不可避免地相互结合起来。

把光子器件和电子器件制备在同一个衬底上，实现上述结合的技术，从广义上称为光电集成电路，简写为OEIC。为此，发展了半导体光导波器件的研究工作。如能实现介质和半导体异质晶体的生长技术，将能制作出包含所有光电元器件的光电集成电路。

光电集成电路的基本结构可分为纵型和横型两种。纵型结构虽然经一次晶体生长可制成，但由于场效应晶体管（FET）下面有采用高掺杂半导体的激光二极管低阻层，所以附加电容较大，不易实现高速响应，因此不被采用。在横型结构中，已经解决了附加电容引起的相互干涉问题，于是，目前在光电集成器件中主要采用这种结构。然而，由于光子器件和电子器件在结构上的不同，表面产生很大的不平坦度，目前虽然已开发出表面平坦化的工艺技术，但是，多数情况下工艺变得非常繁杂而还未达到实用化。

目前，光电集成电路中的主要器件是Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体的发光器件，因此，为了单片集成化，在光电集成电路的制作中主要用Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体材料。根据用途的不同，所用的波长也不同。在光信息处理中，主要使用0.8μm波段的短波长，因此，AlGaAs/GaAs半导体材料便成为光电集成电路的主体。在长距离光通信中，则主要使用1.3μm及1.5μm波段的长波长，因此，InGaAsP/InP半导体材料成为这种光电集成电路的主体材料。对不包含发光器件的狭义的光集成电路或混合型光集成电路，则主要采用石英玻璃系或$LiNbO_3$（铌酸锂）介质波导材料。另外，只包含光探测器的OEIC可以只用Si材料制备光电集成电路。

随着光通信的实用化，人们想利用各种一体化的光器件系统来提高通信的稳定性和可靠性。这种一体化技术被称为集成光学（IO）或光集成电路（OIC）。1969 年由米洛（Miller）首先提出了这种想法。实际上，光集成电路的这一概念从很早以前就开始孕育着。比如，光纤可作为光波导、利用半导体 PN 结区的光调制、半导体激光器具有光波导结构、用半导体氧化膜或离子注入层可形成光波导、二维光信息处理的想法以及波导结构中光参数之间的相互作用的问题等，与此同时，对光纤实用化的研究及双异质结半导体激光器的出现，引起了人们对光集成电路的兴趣，人们期待着光集成化的早日实现。

集成电路具有生产效率高、应用新光路、改善光学系统稳定性、提高工作性能、用波导集中光强度提高散热效率等诸多优点。

在光集成电路中除使用波导光路、波导调制器和偏转器、集成激光器、导波形检波器、非线性导波光路、具有存储作用的波导以及晶体管、场效应管等有源器件外，还使用波导形无源器件如滤波器、单向波导等。因此，从广义角度讲，光集成电路和光电集成电路是不能完全分得开的。

目前在光电集成电路中使用的光源，由普通的半导体激光器逐渐转变成超晶格激光器。这种超晶格量子阱激光器的阈值电流比一般半导体激光器低，可进一步降低激光器的功耗。

作为光电集成电路中的光检测器，目前在研究中的有在 $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ 波导的局部区中形成 InGaAs 肖特基势垒二极管的光检测器及超高速光电导开关光检测器。光电导开关的研究是从 1971 年开始的，但进入 20 世纪 90 年代后，才开始对其高速性能的研究工作。这种器件不仅用作光通信中的光探测器，而且，广泛应用于以纯电子方式难以达到的 100GHz 以上的超高频电信号发生器中。

光电导开关的结构非常简单，是一种由金属-半导体-金属组成的简单的平面结构，它具有与其他电子器件容易集成的特点。光电导开关的基本原理可以理解为夹在两金属电极间的半导体吸收入射光而产生光生载流子，所产生的光生载流子在外加电压的作用下被加速到达电极而变成电信号从外部取出。提高光电导开关速度的关键在于缩短光生载流子行走距离、提高行走速度，也就是减小电极间距离，加大外加电压。当把电极间距减小到 300nm 时，可以得到 870×10^{-15}秒的输出电脉冲，相当于 510GHz。最近用扫描探针加工技术研制出电极间距为 100nm 的光电导开关，其输出电脉冲为 570×10^{-15}秒。这是迄今为止作为光电导型光检测器，在世界上速度最快的光电导开关器件。

光电集成电路的实用化水平主要决定于集成规模和功能的多少。目前，小规模光电集成电路已开始了商业性生产。然而，目前集成规模大的、多功能的和采用波导的光集成电路的实用化为时还早。到 21 世纪，光电集成电路将成为光电子领域的重要技术，这是因为，光子和电子相结合的光电集成电路的采用，有望实现人们盼望已久的神经细胞计算机及能识别和处理图象的光计算机。

4.3 非线性光电器件

发明红宝石激光器一年之后的 1961 年，弗兰肯(Franken)等人首次观测到了二次谐波现象，从此开始了非线性光学的研究工作。当他们把波长为 694.3nm 的红宝石脉冲激光聚集到水晶晶体，并用棱镜分光仪照相时检测到等于脉冲激光半波长的 347.2nm 的紫外光。这就是弗兰肯等人最初观测到的光学非线性现象。1962 年科罗尔等人和原苏联的阿科霍曼诺夫、科霍罗夫首次发表了关于光参量振荡器和放大器工作原理及理论分析的论

文。表 4.4-2 给出非线性光学发展的历史概况。

表 4.4-2　非线性光学发展的历史概况

时　间	现　　象	研究者
1961 年	二次谐波产生	Franken 等
	双光子吸收	Kaiser 等
1962 年	感应拉曼散射	Woodbury，Ng
	相位匹配	Giordmaine 等
	三次谐波的产生	Terhume 等
	合频产生	Bass 等
	差频的产生（微波）	McMurtry 等
	光整流（直流效应）	Bass 等
	自聚焦	Askar'yan
	光谱烧孔	Bannett 等
1963 年	差频产生（光）	Smith 等
	相干反斯托克斯效应	Terhune
	拉曼散射（CARS）	
	物质表面的反射谐波产生	Ducuing 等
	光放电	Maker 等
1964 年	感应布里渊散射	Chiao 等
	光子反射	Kurnit 等
	量子差拍	Corney 等
	光克尔效应	Gires 等
	光强度与折射率关系	Maker 等
	自束缚	Chiao 等
	三光子吸收	Singh 等
1965 年	光参量振荡	Giordmaine 等
	非线性拉曼散射	Terhune 等
	双光子吸收饱和	Yatsiv 等
1966 年	感应光-光散射	Chiao 等
	激光受激荧光	Yardley 等
	能级交叉	Culchaw 等
	模式交叉	Schlossberg 等

续表 4.4-2

时 间	现 象	研究者
1967 年	自感透射	McCall 等
	自相位调制	Shimigu
	光参量散射反转	Harris 等
	Ram dip	Lee 等
1968 年	光章动	Hocker 等
1969 年	感应极化子散射	Kurtz 等
1970 年	感应自旋反转拉曼散射	Patel 等
	（自旋反转拉曼激光器）	
	相位共轭	Woerdman 等
	多光子电离	Agostini 等
	光波导中的二次谐波产生	Tien 等
	光纤中的感应拉曼散射	Ippen
1971 年	自由感应衰减	Brewer 等
1972 年	双光子自感透射	Tanno 等
	双脉冲光章动	Schmidt 等
	多重脉冲光子反射	Schmidt 等
	相干拉曼差拍	Schoemaker 等
	光纤中的感应布里渊散射	Ippen 等
1973 年	绝热随动	Grischkowsky 等
	光波导中的三次谐波产生	Inaba 等
1974 年	绝热反转	Ioy
	选择性多光子分子离解	Ambartzumian 等
	光纤中的四光子混合	Stolen 等
	感应反斯托克斯拉曼散射	
	光纤中的自相位调制	Ippen 等
1975 年	相干过渡双折射	Heritage 等
	双光子自由感应衰减	Matsuoka 等
1976 年	光双稳态	Gibbs 等
	自旋反转拉曼散射	Hu 等
1977 年	三能级光子反射	Mossberg 等
	光波导的光双态	Smith 等

续表 4.4-2

时　间	现　　象	研究者
1981 年	光双稳态中高斯相干共振激发原子的多光子过渡散射（到 27 次）	Tanno 等
	相干 4 光波混合中的压力感应共振效应	Prior 等

布洛姆伯根在广泛研究非线性光学和非线性分光学的基础上，开拓出了广泛的应用领域 。由于他系统地研究了非线性光学，1981 年获得了诺贝尔物理学奖。

从表 4.4-2 可以看出 ，非线性光学的研究过程大体上可分为三个阶段。第一阶段是从 1961～1965 年。在这个阶段中，相继发现了非线性光学现象，并认识了它们的相互关联性和可用性，而逐步形成量子光子学和光学中的新的研究领域。第二阶段是从 1970～1971 年。在这一阶段中，发现了激光分光学中的非线性效应和相干非线性过渡现象、光电离和光破坏等更深层次的各种现象，更深入地综合了解了已知的非线性光学效应，并积极开展光电子学和分光学方面的应用开发研究工作。从那以后到现在的第三阶段，可以说是多样化时代。在这个时期不仅研究出了各种波长可变激光器和微微秒、亚微微秒的超短脉冲激光、超高速检测装置，进而探索多样化的更加复杂的相干非线性过渡现象，而且逐步探明光纤和光波导中的各种非线性光学效应，并证明了其稳定性、低功耗性和高效率性。另外，还以激光工程学和光电子学为中心，研制出了有广阔应用前景的各种非线性光学器件。

第五章　光电子技术

1956 年罗布诺最先提出了光电子学的想法，即把光作为传送

信息的一种回路形成传送信息的新的电路结构。这种想法虽然与后来出现的只用光形成的光电子学有所不同，但当时这种想法是非常新颖的，但这只不过是利用固体发光体和光电导体实现光电耦合作为具体电路的一部分而已。

在很长一段时期内人们以开发出短波段区的电波为无线电工程学的一个重要研究方向。当电波处于100GHz频段时，出现了脉泽，用红宝石证实了微波的放大和振荡。1959年肖洛提出了用红宝石实现光脉冲放大的可能性，第二年由迈曼用实验证明了这一可能性，并很快把电波波长缩短到光波范围。接着由伽凡、本特、哈利奥特等人用He-Ne实验成功1μm波段的连续振荡。通过受激放大技术把电波从微波波段扩展到光波段。光电子技术实质上就是电子技术在光频波段的延续与扩展。

5.1 光纤通信

1966年英国的高昆博士系统地提出了把具有波导结构的玻璃纤维用作光通信的传输媒体的想法。1970年卡普伦(Kapron)等人发表了损耗为20dB/km的实用光纤，这种光纤是由合成石英为光导波芯的单模光纤，1972年他们又开发出损耗为10dB/km的低损耗多模光纤。从此，在世界上掀起了研究石英光纤的热潮，并相继研究出各种类型的石英光纤。例如，1973年由贝尔研究所研制出的以低损耗石英玻璃为芯和包层的单一材料光纤，由日本电子技术综合研究所研制的以石英玻璃为芯、硼硅酸耐热玻璃为包层的ETLOF光纤，1973年由日本茨城电气通信研究所研制的以熔融石英为芯的ECOF偏心芯光纤，1974年由英国南安普顿大学研制的掺磷P_2O_5-SiO_2系光纤，同年出现的日本住友电工的圆筒状光纤，1974～1975年间东北大学和日立公司研制的双重包层W型光纤以及日本电气通信研究所的掺铝光纤等。这时，技术上已

达到了比较容易制作出损耗为 10dB/km 的低损耗光纤的阶段。

另外，除了日本板硝子研究的新型低损耗光聚焦型多组分玻璃系光纤外，茨城电气通信研究所和东芝综合技术研究所还研究了碳酸钠—石灰系玻璃光纤的低损耗化，这就是当时日本有代表性的光纤的研究动向。而在 1974～1975 年间，日本的住友电工和藤仓电线公司积极进行了石英芯、塑料包层光纤的研究。这场光纤低损耗化研究的竞争最终还是以美国的贝尔研究所开发出 MCVD（Modified Chemical Vapor Deposition）方法，制备出在 1.02μm 波长下损耗为 1.1dB/km 的低损耗光纤而渐告结束。这一结果发表在 1974 年在京都召开的国际玻璃会议上。

贝尔研究所的麦克策斯尼等人开发的 MCVD 法极大地鼓舞了当时各国的光纤研究工作者，并成为进一步开发研究光纤的宝贵的种子。这种方法是用氧、氩等气体向安装在玻璃车床上的石英玻璃管中输送 $SiCl_4$、$GeCl_4$、BCl_3 等物质，并从管外用氢氧焰加热到 1 400℃ 左右的高温。这时，在管内部的原料气体被热氧化成玻璃微粒子的同时，很快堆积在管内壁上形成透明玻璃膜。在形成一定厚度的玻璃膜之后，把温度加热到 1 800℃ 左右，降低石英玻璃的粘度，靠表面张力最终变成实芯光纤，即形成以在管内壁堆积的合成玻璃膜为芯、以石英玻璃管为包层的光纤。由于 MCVD 法是从原料供给到玻璃堆积的整个过程都是在封闭系统中进行的，所以无外部杂质的混入，而且用气相输送玻璃原料，因此可以形成高纯度的玻璃膜。另外，通过改变堆积每层芯层玻璃时原料气体的组分和层厚，可以制备具有任意芯层折射率分布的多模或单模用光纤材料。

1976 年 2 月，日本藤仓电线公司的小山内，利用 MCVD 法制备出 OH^- 杂质含量非常低的光纤。这种光纤由直径为 58μm 的掺磷芯层和厚度为 16μm 的掺硼的包层组成，具有阶跃指数型折射

率分布，其外径为 152μm、折射率差为 1.15%、孔径开口率为 0.18。对 1.2μm 波长的光，其最低损耗为 0.47dB/km，OH^-基的含量推测为（80±20）ppb。

这个研究成果的重要意义，不仅在于实现了极低的光纤损耗值，而且在于为今后的光纤发展提供了有指导意义的非常重要的两项成果，一是 OH^-工程的重要性，二是开拓出损耗值低于 1dB/km的成果和 0.8～1.6μm 这样宽的波长范围的低损耗窗口。于是，这一成果后来被人们称为世界光纤开发研究的金字塔。而后，于 1978 年在日本研制出在 1.27μm 波长下损耗值低到 0.5dB/km 的掺 GeO_2 单模光纤，比其他国家先行了 3 年。1979 年初，日本又研制出在 1.55μm 波长下损耗为 0.2dB/km 的光纤。

1977 年日本伊泽等人研究出国际上称为 VPAD（Vapor Phase Axial Deposition）法的新的光纤制备方法。这种方法适用于光纤的连续批量生产，而且材料合成速度快、重复性好，从而大大提高了光纤的质量。1980 年用这种方法制备出 OH^-基含量非常低的 lPPb 以下的光纤，最低损耗值在 1.6μm 波长下为 0.26 dB/km，单根光纤长度达到 100km 长。

光纤的光缆化是实现光传输线路的最重要的问题之一。光缆由很多根光纤组成，为了提高抗拉伸、抗腐蚀和抗机械磨损等性能，在光缆内放置多根纱线或钢丝作为紧固线，在光缆的外表面包有聚氨脂保护套。在光缆中光纤是成对使用的，其中一根用来传送光信号，另一根用于传输接收光信号。因此，光缆中的光纤数一般是 2、4、6、8、12、24、48 和 144 等偶数。另外根据使用环境的不同，如海底、陆上空架、化学腐蚀气体、放射性、温度等特殊要求，还需设计制造特殊的光缆。

在光纤连接上不可缺少的技术是光纤截断器。用刀和剪刀切割光纤时，由于端面成为粗糙的平面，从而引起光的散射而不能

很好地传输光信号。因此，研究出光纤表面保护材料或用护套材料巧妙地施加伸张应力或弯曲应力，在垂直光纤轴方向出现平坦的面之后进行光纤切割的几种方法。在光纤连接上，最困难而且是最重要的问题在于光纤芯太细，不好对准。目前，连接光纤的方法可分为永久性粘接方法和用连接器的连接方法两种。

光纤通信中几乎无例外地都使用半导体发光二极管和半导体激光器作为光源。从原则上讲，光电管、光电倍增管及半导体光电器件都可以作光电转换用的光接收器。但是，能符合光纤通信特定要求的光接收器，目前只有半导体 PIN 光电二极管和雪崩光电二极管（APD）。

光纤通信系统是由把电信号变成光信号的发送光端机和把接收光转换成电信号的接收光端机及传输光的光纤组成的。发送光端机把要传送的声音或图象等信号调制成光调制信号后输入到光纤中，而接收光端机把经光纤送到接收端的光信号进行解调并把它变成电信号后恢复成声音或图象等信号，从而达到传输信息的目的，但光信号在光纤中传送时受到损失，因此传送距离受到限制。信息传送距离主要决定于光纤中光的损耗值，损耗值越小，传送距离越远，要长距离传送信息，就需要采用在一定距离内设中继站的方法。中继站的作用是把在光纤传输中受损的信号进行检波、整形、均衡、放大后再作为光调制信号发送。在光信号传送中产生损耗的主要原因有：光源和光纤的耦合损耗、光纤损耗、检波器的量子效率和耦合损耗等。表 4.5-1 给出了历代光通信系统的各种水平。

表 4.5-1 光通信系统的各种水平

光通信系统	特　　点
第一代系统（短波长、光传送） 波长：0.8～0.9μm 光源：LD，LED 检波器：LED，PIN-PD	多模光传送技术(LED,PIN-PD)(LD-APD)，光强调制和解调。波长复用，双向通信技术，光开关器件材料为GaAlAs/GaAs（发光）、Si（接受器）
第二代系统（长波长多模、单模光传送） 波长：1.3μm 光源：LED，LD 检波器：PIN-PD，APD	低损耗多模光传送技术。单模光传送技术（使用零折射率分散波长） 器件材料为 GaInAsP/InP（发光） Ge、GaInAs（接收器）
第三代系统（长波、长单模光传送） 波长：1.5～1.65μm 光源：LD 检波器：PIN-PD APD	极低损耗单模光传送技术，光强调制和解调。时间、波长复用，双向通信技术。相干光通信（外差作用）集成激光器，光集成电路 器件材料：GaInAsP/InP（发光） GaInAs，Ge（接收器）
第四代系统（全光系统） 波长：0.8μm 1.2～1.65μm	光交换（光开关、光运算） 高功能光集成电路（单模光传送技术）
第五代系统（超长波长光通信） 波长：＞2μm	超长距离光通信可能性的探索（超低损耗氟化物光纤的研究）

注：LD 是激光二极管，LED 是发光二极管，PIN-PD 是 PIN 光电二极管，APD 是雪崩光电二极管。

人们正式研究光通信是从第一代系统开始的，目的是研究它的各种可能性，并延续到下一代系统中。其中，由发光二极管

(LED) 多模光纤和 PIN 接收二极管 (PIN-PD) 组成的短波长多模光传送技术由于多模光纤中模式耦合噪音小，所以具有光源温度特性好、检波器噪音低等特性以及光纤的绝缘性和无感应性等特点，从而形成了非常独特的简易光通信系统。表 4.5-1 中的第二代光通信系统的长波长多模光传送系统是具有上述特点的多模光传送系统。对 1.3μm 波长的光来讲，因二氧化硅材料的折射率分散为零，从而减轻发光二极管光源所涉及到的 120nm 光谱扩散带来的群延迟效应，另外，长波长光通信作为宽频带低损耗的简易光传送系统而引起了人们的注意。因为使用了 Ge 或 GaInAs/InP 检波器，虽然噪音稍大一些，但利用光纤的低损耗特性及接收二极管和场效应晶体管的结合可以弥补这一缺点。称为第三代光通信系统的长波长单模光传送系统是可以发挥二氧化硅光纤原来性能的真正的宽频带低损耗光传送系统，人们认为这个系统是可以普及到家庭中的未来的具有代表性的光通信方式。

第四代全光通信系统，目前虽然处于基础研究阶段，但已进入光交换器的研究阶段，人们已在考虑实现该系统的可能性。

近几年来人们发现，2～5μm 波长的光在氟化物光纤中的损耗值比在石英光纤中低 2～3 个数量级，于是出现了第五代超长波长光通信系统，人们预测利用这种光通信系统可以实现横跨太平洋的无中继光纤通信。

5.2　激光存储技术

激光存储技术是 20 世纪 70 年代开始发展起来的一种全新的记录信息的光电子技术。现在的光盘是用透镜聚焦的微小光点，在盘面上以微小的凸凹或磁化方向记录信息，而后作为明暗信号检出再生的信息。由于光点的大小决定于光波长的长短，波长越短光点越小，可记录的信息量就越大。

光盘大体分为再生专用激光电视光盘（VCD）、激光唱片（CD）及可记录的光盘两大类。为了提高再生专用光盘的存储密度，人们正在研究利用短波长激光使光点进一步微小化。可记录式光盘有追记型和重写型两种，已实用化的追记型和重写型中的光磁与相变记录都是采用把光能变成热能而记录的热模式。

与此对比，在利用光反应进行记录的光子模式中，由于是利用了波长、偏振、相位等光的特性进行记录的，因此可以进行多重化记录而进一步提高记录密度。利用光的波长特性进行多重记录的方法有利用在极低温下光化学烧孔现象的光谱烧孔法和利用常温下的彩色反应的记录方法。利用不同波长具有不同的记录特性，可在一个光点中进行不同波长的多重记录，从而大大提高记录的信息量。但为了实现高多重度的波长多重光记录，需要波长选择性很高的记录媒体，也就是需要具有窄带吸收特性的材料。从这个观点出发，人们对显示室温窄带吸收特性的斯派罗皮兰感应集合体进行了研究。这种感应体是属于光子模式的记录材料，与特定波长的光进行反应分子结构发生变化，并按以下关系重复着色（消去）和消色（记录）。

$$\text{A（消色体）} \underset{\text{光或热（记录）}}{\overset{\text{光（消去）}}{\rightleftharpoons}} \text{B（着色体）}$$

单分子体的斯派罗皮兰感应体着色体的吸收带很宽。但是根据分子排列的控制，在偶极子-偶极子相互作用而形成几个分子的集合体时，可以做到吸收谱的窄带化。

光盘可以实现高存储密度，再加上上述的多重光存储技术的发展，可以实现更高的存储密度。但是，它不能确保更大的存储面积，所以不仅它的存储容量受到限制，而且也不能长时间收录广播信息。为了解决这个问题，目前人们正在进行光带存储技术的研究。像磁带那样，在很薄的基带上形成各种光记录媒体，这

种利用激光进行记录和再生的记录方式叫做光带记录。

为了用小型装置实现如同图象信息那样的高位记录，就需要高速旋转的激光束，并要考虑发挥光的特点，目前人们正在研究开发光带存储系统的技术。用激光束在光带上边进行圆弧状扫描，边记录边再生信息。

这种光存储系统除了具有记录信息高密度性外，还具有以下特性：(1) 记录和再生信息的非接触性；(2) 不同于录像带，不存在装入、取出带的动作，可做成密闭结构的带盒，既可防尘又可简化走带系统；(3) 可以使用光卡媒体。为实现光带存储系统，就需要发展光带存储媒体技术、旋转光头技术、聚焦和跟踪等激光束控制技术、走带系统技术和信息处理技术等。

光带记录系统是完全新型的光存储器。目前已提出了各种不同形态的记录装置。这种技术可广泛应用于视频存储、家用大容量存储、多媒体超大容量存储、光盘存储等各种存储器。目前光带存储器的记录面积已达到激光唱盘的 2 400 倍，而其 VHS 尺寸的存储量可达到激光唱盘的 1 200 倍，即达到 1T ($1T=1\times10^{12}$) 字节以上。

5.3　激光印刷技术

光电子印刷技术主要包括复印技术、激光打印技术、激光照排技术等。光电子印刷具有操作方便、排版灵活、印刷速度快、分辨率高、质量好、成本低、噪声小等优点而被广泛应用。最近，复印机、激光打印机已和微机一样，在我国已普及到各个地方，给办公自动化和各种数据报表、文件和图象的复印和打印带来革命式的改革。在世界激光系统的总销售额中，激光印刷系统所占的比重，1987 年为 50%，1992 年已上升到 55%，这说明它的增长势头之快和它在激光产业中的重要地位。

激光打印机是一种计算机的输出设备。它打出的文字和图象比一般计算机打印机打出的要清晰得多，速度也快。激光打印机按打印速度可分为高、中、低速三个档次。高速打印机以 IBM 3800 和 SIEMENS No. 2 为代表，每分钟打印超过 100 页，是大型通用计算机的集中打印输出和汉字信息处理系统使用的高速打印设备；中速打印机以 IBM 6670 和 XEROX 5700 为代表，每分钟打印 30～60 页，是字码处理中心集中打印输出设备；低速激光打印机是 20 世纪 80 年代随着办公自动化而快速发展起来的小型、灵活多用和价廉的微机输出设备，打印速度每分钟 20 页左右。

激光打印机的光源采用的是半导体激光器，打印的密度为每 25mm300 点以上。目前，随着半导体激光器的输出功率逐渐提高，电子线路集成化使激光打印机向小型化、高速化、大内存、多功能化方向发展。日本理光公司正在研制以复印、打印和电传三种功能合为一体的多功能机型。

常用激光照排机的分辨率为每毫米 40～50 线，8 开纸面的扫描的速度为每 3 分钟一页。经常使用的氦-氖激光器的波长为 632.8nm，功率为 5～10mW。北京大学、四通公司等单位已制造出激光照排机，目前，中央和省级报纸均已采用激光照排技术，许多印刷厂和出版社也纷纷采用激光照排机，它在国内市场上已占据主导地位，并已开始向国外销售。

光电子印刷技术与数字通信技术相结合，通过通信卫星把《人民日报》当日编排好的版面，整版地从北京传输到各边远地区，直接控制当地的激光照排系统和制版系统，实现了与北京同步印刷出版当天《人民日报》的计划。另外，目前彩色印刷技术也有了相当的发展，依靠激光分色机和激光扫描的精确定位技术，能使色彩鲜艳、形象逼真的印刷品方便快捷地复印、打印或照排、制版、印刷出版，它给印刷出版界带来了新的生机。

5.4　光电子显示技术

光电子显示技术是在现代信息系统中最重要的终端输出技术。目前已投入使用的光电子显示器有阴极射线显像管（CRT）、液晶显示器（LCD）、发光二极管显示器（LED）、等离子显示器（PDP）、电致发光显示器（EL）、真空荧光显示器（VFD）和激光大屏幕显示器等。这些显示器被广泛应用于电视动态图象显示、交通信息显示、商业广告显示、计算机终端显示、体育比赛显示、导弹飞行轨迹显示、工业生产流程显示等各种信息显示领域。

光电子显示技术按其工作原理可分为主动发光型和被动发光型两大类。CRT、VFD、LED、PDP 等显示器属于主动发光型，而 LCD 显示则属于被动发光型。

CRT 是人们早已熟悉并经常使用的阴极射线管，它具有高亮度、宽视角、响应速度快等特点，长期主宰着光电子显示市场。随着 LCD、PDP、EL 等各种新型平板显示器的相继出现，打破了以往 CRT 一统天下的历史，以液晶显示为首的平板显示器对 CRT 形成了强有力的挑战和竞争，尽管如此，CRT 市场和技术依然在稳定发展，在今后的很长时期内，将仍然保持光电子显示器市场中的主导产品的地位。

液晶的发现已有 100 多年的历史了，而液晶进入到我们生活中来只不过才 20 多年。液晶是介于液体和晶体之间的中间体，又称流动晶体，它既有液体的流动性，又有晶体的异向性，所以它具有魅力而又神秘。人们不断合成新型的液晶材料，并观察到了有趣的物理现象和新的液晶相结构，丰富和发展了液晶学。1968 年 G. H. 海尔迈尔（G. H. Heilmeir）等人提出了动态散射效应（DSM），简写成 DS。这一模式的发现，揭开了液晶显示的序幕，使得 LCD 在手表和计算器中被大量应用；同年海尔迈尔等又提出

了宾主模式；1969 年施乐公司的 J.E. 亚当斯和 W. 希斯等人提出了胆甾-向列相变的存储模式；1971 年由 M.F. 舍克尔（M.F.Schiekel），K. 法林松（K.Fahrenschon）和 G. 阿舒林（G.Assoulin）提出了电控双折射效应；同年，由 M. 沙德特（M.Schadt）等提出了扭曲向列液晶显示器 TN-LCD，这是在液晶显示发展史上的重大发明，至今仍是 LCD 的主流；1972 年由小林和竹内成功地研制出无缺陷的 TN-LCD 显示屏，并迅速工业化，但 TN-LCD 显示器难以克服易读性差的缺点。为此，P. 波洛第（P.Brody）于 1972 年提出了有源矩阵（Active Matrix，简称为 AM）方案，即在每一个像素中设置叫做薄膜晶体管（TFT）的开关器件，提高响应速度，并赋予存储特性，这是现有的液晶电视所采用的主要模式。为了改善 TN-LCD 的不足，1984 年由 T. 舍费尔（T.Scheffer）和 J. 奈林格（J.Nehring）等人提出了超扭曲（Super Twisted Nematic，简称 STN）液晶显示方案，这可以说是液晶显示发展中的又一重大突破，它大大改善了 TN-LCD 的不足。此外，1980 年由 N. 克拉克（N.Clark）等人提出了表面双稳铁电液晶（FLCD），从而增大了信息显示容量，并提高了响应速度。

1988 年日本东京工业大学的福田等人发现了反铁电液晶材料（AFLC），它具有与铁电液晶相匹敌的高速响应性、适于简单矩阵显示方式的双滞后现象及定向性稳定等特点，并作为高功能显示材料和新的学术研究内容引起了人们的兴趣。

1989 年日本电装集团成功地开发出氟系反铁电液晶材料，并首先用于液晶显示器中，研制出对比度为 20∶1、响应时间小于 30μs 的显示器。这种显示材料具有防机械冲击能力强、可消除残象现象、液晶定向具有自修复性等特点。

为了实现液晶显示的全色化，A.G. 费舍（A.G.Fischer）提

出了在液晶盒外加上红、绿、蓝镶嵌滤色片的混色方案，而内田等人提出了在液晶盒内镶嵌滤色片的方案，这种方法是目前用于彩色液晶显示的主要技术，用这种技术制作的彩色液晶显示器已实现了商品化。

液晶显示模式还有20世纪80年代初提出的聚合物分散液晶显示（PDLC）和液晶聚合物显示。前者不需要偏振片，具有柔软性，可用于大型显示器、调制光强等。后者响应速度慢，只能用于静态图象显示。

STN-LCD现已成为膝上型计算机和文字处理机上不可缺少的重要器件。目前，这种显示技术已由双层液晶盒的黑白显示技术发展成采用光学双折射膜的黑白显示技术。在1992年SID会议上，舍费尔提出了主动寻址（Active Addressing）驱动方法，使STN-LCD能够实现视频显示，为STN-LCD的应用开拓了更广阔的领域，STN-LCD工业已成为LCD产业的重要部分。

有源TFT-LCD是目前液晶显示器发展的主流，也是目前平板显示器市场的主导产品，每年以15%的速度递增。目前普遍采用的非晶硅薄膜晶体管（a-Si TFT），因为它的迁移率低，从而响应速度受到限制，为克服这一缺点，人们正在研究开发多晶硅和硒化镉薄膜晶体管。

等离体显示是利用伴随放电而发光的一种显示器。它作为最先实用化的光电显示器之一，在显示器研究开发的历史上占有重要的位置。随着个人计算机和办公自动化设备性能的多功能化，对显示器的要求也越来越高，要求显示器具有大面积显示和大容量显示的性能。正是因为等离子体显示器能够满足这一要求，从而引起人们极大的兴趣。等离子体显示器具有其他显示器不具备的以下特殊的性质。（1）高对比度：因为等离子体显示具有非常强的非线性特性，所以除了被选定的像素外的其他像素完全不发光，

因而即使对应一条线有 1 000 个以上的像素也丝毫不降低其对比度。(2) 大面积显示：已经实现了对角线为 1.5 米的单色交流(AC) 等离子显示屏的实用化。(3) 容易实现全色显示：用伴随放电发射的紫外线激发荧光体的方法，彩色化程度已达到了 CRT 的水平。(4) 长寿命：用 MgO 作保护层的 AC 型等离子显示器的寿命已达到 35 万小时。(5) 高亮度、高发光效率：已得到亮度为 10～500fL、效率为 0.1～1.6lm/W 的结果。(6) 宽视角：具有非常广的视角，有的 AC 型等离子显示已达到几乎 360°的视角。(7) 耐热性能好：工作温度并不受等离子体显示自身性质的限制，而是受驱动电路中半导体器件的工作条件的控制。

1927 年贝尔系统首次把气体放电发光现象应用于显示器中，并研制出电视样机。利用气体放电现象做成的第一个实用化的显示器就是 1950 年研制出的气体放电数字管。当时，这种数字管只能显示数码和有限的英文字母。1950～1960 年间，人们开展了对点矩阵式等离子显示器的研究工作。但由于未能达到只对被选定的像素选择放电的目的，因而没能实现实用化。1964 年伊利诺大学的毕泽尔 (Bitzer) 和斯罗托 (Slottow) 教授首次解决了这一难题，发明了 AC 型等离子显示。他们利用在金属电极上面覆盖一层介质膜的方法，得到了在每一个像素上附加一个电容的等效作用，实现了选择放电的目的，同时得到了非常有效的记忆功能。1968 年由奥温斯-伊利若 (Owens-Illinois) 公司实现了 AC 型等离子显示器的实用化。1970 年布罗奥斯公司的霍尔茨 (Holz) 和奥格尔 (Ogle) 发明了自扫描式 DC 型等离子显示器并实现了实用化。

事物在运动，技术在发展，研究不会停留在原有水平上，当然，光电子显示技术也不例外。以液晶显示为代表的平板显示技术的出现克服了 CRT 显示所具有的体积大、重量大、功耗大的缺点，曾给人们带来过一个惊喜。但是，LCD 存在视角小、亮度低、

响应速度慢等缺点。人们在不断地改进 LCD 的同时，探索着新的理想的显示技术。1986 年法国国家实验室研制出叫做场发射显示（FED）的新型显示器，给显示技术的发展注入了新的活力。FED 是以场发射冷阴极阵列为电子源的新型平板显示技术，它集 CRT 和平板显示技术的优点为一体，实现了人们长期以来所向往的把 CRT 平板化的美好愿望。1991 年已研制出全色 FED，1997 年将会出现 FED 产品。

5.5　光互连

人们站在 G（千兆）位存储器时代入口处的今天，把超高集成器件作为系统组装时，最困难的问题是互连问题。能不能进行光互连呢？这时，电光（E/O）、光电（O/E）转换效率究竟怎样呢？这是实现光计算机的关键技术之一。

计算机等电子系统今日的昌盛完全是基于硅集成电路的超大规模集成化的技术。然而，在系统中，如果这些结构元件之间不能形成必要的互连，那么就不可能发挥整个电路应有的功能。正像在超大规模集成电路中的布线问题一样，互连问题是实现系统功能的最重要的问题之一。

近年来，随着计算机信息处理容量的激增和通信系统的高速化、高性能化的发展，光互连问题作为非常重要的技术课题重新被提了出来。也就是说，在目前所采用的电子式互连中，信号的延迟和功耗等问题已经表面化了。于是人们对把有效利用光特有的高速性、并列性、无感应性的光互连作为解决这个问题的技术寄予厚望。

连接组成系统的装置、电路、器件等结构要素的方法大体可分为“母线方式”和“电路开关方式”两大类。在母线方式中，多数的信息处理器和存储器之间的通信是通过共同的母线传送线路

进行的。由于信号路径的设定而产生的信号重叠，需要避免信号冲突的协同设计。另外，因为互连的通过量（传送速度与频道数的乘积）是由母线的传送速度决定的，在增大并列信息处理器时，通信的等待时间将会增加。但是，这种连接方式对硬件无影响，可以实现器件所对应的技术性能，因此，目前它在很多系统中被采用。

纵横交叉制结构是采用电路开关连接方式的典型例子。因为这种连接方式从输入到输出所经过的开关延迟时间与路径无关，所以，对形成系统结构非常有利。但是，对 n 个输入输出频道，需要 n^2 个开关连接，当 n 变大时，互连量变成庞大的数目，从而使硬件的负担过重。作为实用的开关结构，已研制出各种多段开关网，在更频繁地传送信息的超并列信息处理器系统或大容量交换系统中，要求采用母线方式的多重传送线路或电路开关方式。但是，用电子技术实现复杂的互连时会出现各种各样的问题。

在光互连中，根据传送距离可以使用不同的传送媒体。比如在系统之间、架间或电路板之间可以使用光纤，电路板内或芯片之间可以使用介质波导或自由空间。光互连将会具有以下优点：

（1）在任意传送媒体中都可以得到宽频带特性。根据激光和光接受器件的高速特性，可以进行高速、大容量传送。利用低损耗光纤的长距离传输特性，已在光通信中付诸实施。由于光不需要阻抗匹配或接地，所以在实用上非常方便。

（2）由于光交叉时无交调失真，甚至在自由空间中也可以进行多个信号的并列化，所以它不仅可在空间并列化，而且可在波长区域中进行信号的多重化。这在电子式互连中是做不到的。

（3）利用波导开关、半导体发光器件和光电集成电路技术，可以实现光信息处理功能，也可实现面发光激光器和光双稳器件等新型光功能器件。利用这些匹配性能好的器件，可以提高配线的

柔软性，达到简化系统、提高性能的目的。

（4）光器件可以微型化至波长量级。而且，由于光传输损耗极小，可以实现互连整体的小型化和低功耗化。

目前，实现不受距离限制而大容量信息传送的并列光环的开发研究已成为光互连实用化研究的最先锋。另外，面向21世纪，将要开展连接的功能化研究，进一步开展适于电路板与芯片间及系统内部光互连的研究工作。为此，需要开展以器件微型化和多功能化为目的的器件集成技术的研究工作。经过人们的努力，将会越过电子系统所面临的布线障碍，最终确立光互连技术，迎来21世纪崭新的光电子信息时代。

第五篇
21 世纪光电子技术综合发展的新时代

纵览电子学发展史，可以看出一条主线，这就是信息电子学。特别是 20 世纪 90 年代以来，半导体、光纤及电子计算机技术的综合发展，将引发一场信息革命。

目前在相关刊物上经常可以看到，“21 世纪将进入光电子时代”或“21 世纪是信息革命的时代”等类似的评论。这两种提法是从不同角度预测电子学的结果，其内容也各有侧重，但确实存在共同的内涵。从发展的观点来看，信息革命有赖于光电子技术的发展。反过来，信息技术的进步也必然促进光电子技术的腾飞，并从而带来整个社会的重大变革。

在这一篇里我们集中介绍信息网络、微电子学和光子学的发展趋势，以及这一发展会给未来社会带来的巨大变化。

第一章　信息网络的发展趋势

20 世纪 90 年代以来，出现了全球性信息热潮，信息化程度已成为国家现代化水平和综合国力的重要标志，而且也成了各国激烈竞争的热点。目前世界上许多国家正在实施的“信息高速公路”计划就是这一竞争的实际步骤。

所谓“信息高速公路”是指以光缆为主体的大容量、高速度的信息网络为“路”，以电脑、电视、录相和通信功能等为一体的

多媒体终端为“车”，将学校、厂矿、机关、军队、医院及图书资料中心联结在一起，能快速为用户提供大量信息的网络系统。目前这一网络的发展趋势就是综合化、宽带化、智能化、多媒体化和全球及个人化。

1.1　综合化

通信网的综合化包括业务综合、传输与交换综合、有线与无线综合、业务网与支撑网的综合、硬件与软件的综合、元件与系统的一体化以及通信与计算机的综合等。

业务综合主要指用单一网络来支撑范围广泛的业务。例如在电话网的基础上借助于一组标准化用户/网络接口，可提供端对端的 64kbt/s 数字连接用以支持范围广泛的窄带业务。利用这种综合业务网可提供高质量话音、桌面型电视/电话/数据点到点或到多点的多媒体通信。

传输与交换的综合是指信息传送与控制的综合。光互连与光交换技术的发展必将大大促进这一综合技术的发展，最终可能实现传输与交换的共用和统一。

有线与无线综合可视为接入网中的有线与无线技术的相互竞争互为补充。在网管方面可将有线网元和无线网元共置于同一传输网管平台。

业务网与支撑网的综合是因为通信技术的高度发展，单靠业务网已不能正常运转的缘故。特别是综合数字业务网更不能离开信令的支持。通过支撑网和网管系统可实现业务提供，如配置管理、故障管理、性能管理和计费管理等多种功能。

硬件与软件的统一和元件与系统的一体化，这是非常容易理解的。因为硬件离不开先进软件的开发，而一些软件又常常固化在硬件之中。这种高度综合的结果，使元件与系统的界线更加模

糊，进而实现一体化。

微处理机不仅大量用于通信设备之中，而且插上多媒体卡，就可成为多媒体终端，这就体现了通信与计算机的高度综合。

1.2 宽带化

光纤的带宽是任何传输媒质所无法比拟的，在 1.31μm 和 1.55μm 波长附近均可达到 25THz 的带宽。也就是说，如果一路话占 5kHz，全世界 50 亿人就可以同时用一路光纤通话而互不干扰。而波分复用（WDM）、时分复用（TDM）、光时分复用（OTDM）及光孤子（Soliton）又是已经提出来的进一步开拓光纤通信带宽的新方法。

波分复用是在一路光纤中传输若干个波长的光，每个波长所载的信息可独立运用。

光孤子是一种大功率窄脉冲，光纤非线性和色散相互抵消，传输损耗由光纤放大器（EDFA）来补偿。于是，经过长距离传输仍保持波形幅度和形状不变，从原则上讲可以超长距离传输高速信号。

利用光时分复用的方法可将多路光孤子复用，从而实现更大容量的光信息传输。

1.3 智能化

用户对通信的要求与日俱增，他们都希望利用其终端获得更多的业务服务，同时也希望对电信业务有更强的支配能力。

智能网就是基于这种要求而建立起来的。它的基本设想是改变传统的网络结构，使用户对网络有更大的灵活性和更强的支配能力，以有限的功能实现多种业务。智能网一般由业务交换点（SSP）、业务控制点（SCP）、共路信令网和业务管理系统

(SMS) 等构成，目前已能提供 30 余种业务。

1.4　多媒体化

多媒体化是指在一次呼叫过程中能提供多种信息类型的业务。使用多媒体通信能充分利用人的各种感官，从而实现最有效、最生动的信息交流。

多媒体通信的突出特点是业务形式多，如会议、对话、检索和收集等；另外是信息类型多，如声、文、图、像等。从功能上看又具有交互性、分布性、同步性和实时性。这就要求在网络中引入媒体控制与媒体交换功能，以便使原来点对点通信能力扩展到媒体交换通信中的多点到多点的连接能力，并且要求终端能集成多种媒体信息，对多种媒体信息实现同步且具有交互功能。

1.5　全球及个人化

通信技术全球化主要表现为网络全球化和服务全球化。也就是要建立一个全球范围内综合利用通信网、计算机、多媒体终端、数据库和各种软件技术，集人类的科研、工作、生产、生活乃至娱乐为一体的智能信息系统。个人通信网无疑也置于这个庞然大物之中，实现任何人、任何时候、任何地点都能自由地与地球上的其他任何人通信。

综上所述不难看出，信息网络的发展规模越来越大、功能越来越全、服务对象越来越多，其结果将会使我们的地球变得“越来越小”。

第二章 支撑网络的计算和微电子技术的持续发展

计算机是构成信息网络的最基础部件，而半导体芯片又是计算机的心脏。因此，伴随信息网络的形成和发展其核心技术必须提早开发。

2.1 计算机硬件

信息的存储和处理是计算机的两个基本能力，这两方面的研究工作在21世纪必将得到突破性进展。

现在每个半导体芯片可制作几百万个元件，预计几年之后这个容量可达到令人震惊的程度，即一个芯片可包含10亿个元件。为提高计算机处理速度，GaAs芯片不久将商业化，因为这种芯片运算速度要比Si提高6倍以上。

并行处理技术的突破，给计算机运算速度带来了非同寻常的进展。而神经网络系统也将像文字处理一样得到广泛应用。

光盘将像磁盘一样普及，它不但可以大大提高数据存储能力，而且可擦光盘还可以随意改变文件内容。目前一个光盘可存储1 000兆字节的数据，即一部多卷本的百科全书。然而这一存储密度还在迅速增加，可以预测，再用10年左右的时间，一个小型图书馆即可存储于几个光盘之中。

光纤入网并迅速到户必然导致更多的人愿意使用掌上便携机应付简单的日常性工作。

考虑到光纤、光盘及光通信的未来，人们认为信息技术的归宿将是光计算机的想法是不足为怪的。

2.2　计算机软件

有人曾提出未来将属于“没有计算机的计算机公司”。可见复杂计算机软件开发的重要性。

阻碍计算机软件发展的一个最大的问题是软件生产自动化。过去设计一个大型的信息系统要编写成千上万条程序，投入千百万美元，花上几年的时间。因而亟待开发新的高速编程方法，目前看来最有前途的方法是计算机辅助程序设计和面向用户的程序设计。如果这两种方法能够像人们所希望的那样工作，那么在需要编程时设计者只需输入逻辑想法，由计算机自动调用各种标准软件包，并由它们组合起来，形成人们所需的信息系统。

与人工智能相比较，应用智能更为现实。专家们普遍认为，随着专家系统领域的发展，再用 10 年左右时间，大概所有常规工作，如教授类似数学和语言等标准化课程、雇员培训、图书馆文献检索等均可以实现自动化。

为便于人们与计算机交流，声音界面必将得到极大的改善。最近已推出的软件可以准确地执行复杂的语言命令，包括运行软件程序甚至操作扫描仪；语言自动翻译水平也得到了极大的提高。

2.3　微电子技术

为适应计算机大容量高速处理的需要，半导体器件的发展趋势必然是高密度化和高集成化。为此必须开发和以前完全不同的加工技术并引入新的基础材料，其中包括基片大口径化、亚微米光刻、高深径比刻蚀、多层布线、整体平坦化及相应新材料开发技术等。

第一是对基片的选择，现在世界各国都制订了大口径化的全面计划，计划提出 21 世纪初基片直径即可达 300～400mm。与此

相关的大口径基片制作设备、单晶的评价以及与此相适应的外延技术等都将得到迅速发展。另外，为提高CMOS器件性能和实现三维集成，SOI（Silicon On Insulating Substrate）和离子注入隔离基片正受到世界各国的高度重视。

第二是亚微米光刻技术，目前半导体生产线使用的最小加工尺寸0.5μm和0.35μm已不能满足器件发展的需要，人们将向0.25μm的时代迈进。为满足这一加工尺寸的需要，现已先后发展了电子束曝光、软X射线曝光及聚焦离子束曝光等先进亚微米光刻技术。这些技术各有其特点，特别是聚焦离子束可实现曝光、掺杂、刻蚀一体化，可谓是很有前途的一种新技术，但也确实存在各自的难题，其中共有的问题是加工时间长、设备庞大、成本高，因而从生产角度考虑，深紫外的准分子激光曝光是最有竞争力的。

在微刻蚀技术中主要将发展高深径比和无损伤刻蚀技术。为此低压高密度等离子体刻蚀可能代替现行反应离子刻蚀技术。

由于金属层和栅极电极将为多层结构，因此刻蚀的选择控制就显得特别重要。为了形成触点和通道需加工与单元芯片大小相当的高深径比的微细小孔，这无疑又增加了刻蚀技术的难度。与此同时，强电介质如PZT以及新电极材料Cu等微刻蚀技术也都亟待开发。

第三，多层布线技术和与此相适应的薄膜形成技术是VLSI发展中必不可少。其中低介电常数绝缘膜即含氟SiO_2（SiO_2F）及高电导率电极材料Cu膜的形成就是典型的例子。此外，动态存储器电容或新型存储器件用的强电介质薄膜等都是今后研究的重点课题。

第四，器件制作过程中的平坦化技术是提高光刻分辨率基板材料利用率和器件可靠性的关键。为此相应的研磨方法、研磨材料、研磨布甚至包括研磨过程中清洗药液等都要得到及时开发。

在这一节里重点介绍了支撑信息网络的电子计算机及其心脏——半导体芯片技术的发展趋势。对于将成为 21 世纪信息主体的光电子技术，在下一章中详细介绍。

第三章　光子技术的崛起

在本篇的引文中我们曾提到，近年来半导体、光纤和计算机技术的综合发展，将引发一场信息革命。然而这里指的半导体已不只是人们观念中的微电子技术，在某种意义上讲应主要是指光子技术，至少是光电子技术。这一节我们将重点介绍光子学内涵、光子技术特点及其发展趋向。

3.1　光子学内涵

自 20 世纪 60 年代激光器问世以来，在古老的光学学科领域里开辟了一个具有深远意义的广阔天地。人们可以获得谱线很窄的单色光束，其干涉长度可达几十米，从而为全息光学及其应用的发展奠定了牢固的基础。

激光具有极好的方向性，因而激光束的能量密度可大大超过以往任何光源，其中包括太阳在内。这不仅为加大光通信的距离，同时也为非线性光学的发展奠定了基础。正是由于非线性光学效应的提高，人们才可以利用光频调 Q 和锁模技术来获得比光波振荡周期还短的超快（飞秒）光脉冲。非线性光学效应的强化还使得光学倍频参量放大相位共轭和光孤子传输等技术得到了迅速发展。激光连续调频技术的发展又使相干光探测成为可能。

半导体激光器自 1962 年诞生以来，一直受到人们的极大关注。它具有微型化、电注入、高效率、低功耗和可直接调制等优点，尤其是电注入泵浦方式使得它可以与电子功能器件直接接轨，

从而使发展光子、电子器件集成成为可能。

半导体超晶格、量子阱人工材料的开拓，不仅优化了半导体激光器的性能，扩展了波长覆盖范围，更重要的是由于其具有多功能的特点，从而提高了器件集成的兼容性，为光子、电子的集成化创造了条件。

以半导体激光器为基础的光纤通信技术的发展，是激光问世以来对社会影响最为深远的一项成就。它使单线信息容量提高了几个数量级，进而为信息化社会的到来铺下了坚固的基石。

光子说源于古代，那时人们对光的本质并未真正了解，麦克斯韦统一电磁场理论后，人们认识到光的波动性。由于光的产生大都起源于原子系统中能级间电子跃迁时能量的释放，因此就本质来讲，光确实是一种粒子即光子。

光与物质的相互作用，如散射、吸收、激发等都充分体现了其粒子特性。在常见环境中传输光都呈现出波动性，如衍射、折射和反射等。然而随着超快技术的发展，光的粒子传输特性也将越加显现出来。

在这短短的30多年间，古老的光学技术已经显现出它蕴藏着的巨大潜力，与电子技术一样，它的成就已经被人们所熟悉和利用。而对光子学内涵也可以与电子学类比，从实质上讲光子学应该是研究光子运动、相互作用及其应用的一门科学。

固体光子学是从信息科学的角度，把光子技术与电子技术相类比提出来的。固体电子学发展的高峰就是今天的半导体微电子学。众所周知，它是建立在以两种不同导电类型的半导体所构成的P-N结基础上，加以设计组合形成电子功能块的。电子作为信息载体在半导体中传输，通过操纵控制电子在半导体中的运动行为，可以获得电子开关、振荡、放大、记忆、存储等诸多功能，从而能够实现对信息的载入、传输、再生、交换、处理与读出等。根

据人们的需要，按系统要求把多种电子功能器件，通过内部引线连接并集成在一个很小的基片上，这就是人们所熟悉的集成电路。随着半导体微细加工技术的成熟，集成电路的规模与功能已达到惊人的地步，一平方厘米的芯片上可包含上亿个单元器件，一个复杂的专用计算机的功能在一个芯片中就能够实现。然而在传统的电子学中，电子（或空穴）只是作为一种荷电粒子的信息载体出现的，对其传输信息的表征往往只由电子运动速度矢量体现。因而对信息传输与处理的速度就不能不受到回路分布参数的限制（一般为 10^{-9}秒）。于是人们开始想到利用光子作为信息载体，光子的运动不受回路分布延迟的影响，因而可以大大提高信息系统的传输与处理速度。另外，由于光的传输又呈现波动性，作为信息载体，它除具有振幅强度表征外，还蕴含着诸如波长、相位、偏振等可为利用的丰富资源。

光子在固体中的传播速度比电子快三个数量级，人们还可以利用波分复用技术实现单通道超大容量信息传输。激光又具有极好的相干性，借助全息技术可以实现高密度分束存储，光学并行处理技术将使信息系统承受信息的容量有惊人的扩展。不同源点发出的光是不相干的，因而对实现高密度三维交叉互连特别方便。

这门基于操纵和控制光子在固体中运动从而实现对信息的载入、传输、交换、存储、再生、处理和读出的科学就是固体光子学。

当前最有发展潜力的两种固体媒质就是半导体和光纤。而半导体现已发展成以量子阱材料为基础的多种性能优异的电注入激光器、探测器和几乎通信所需的各种有源及无源光子器件，因此固体光子学的发展也将以半导体光子学为代表。

半导体电子学的强大生命力在于其集成化。集成化使它的处理功能和运行速度得到大幅度提高，功耗大大降低，尺寸更加缩

小，芯片的成品率和可靠性进一步改善，从而使芯片性能价格比不断得到优化。

当代信息技术对半导体光子学提出了要求能够荷载超大信息流传输，并同时具有实时、高速处理与交换的能力。而功能集成化也是半导体光子学发展的必由之路。根据系统功能的要求，把不同功能诸多光子器件通过内部光波导互连，优化集成在一个芯片上，以突破分立器件功能的局限性，这就是当前迅速发展着的半导体集成光子学。

虽然在信息系统中，其核心部分的功能基本全部由光子的运行操作来实现，但是一个完整的应用系统若没有电子器件的相辅相成地配合是很难具有实际意义的。比如激光器需要恒定电流的驱动，光子开关、调制器件要利用光电效应才能实现，光子接收器也必须由偏置电场来操作，而信息终端的处理与再现还是利用成熟的微电子技术更为方便。

未来集成系统必然是光子集成和电子集成的共融体，称为光子、电子集成（PEIC）。不言而喻，光子集成回路将是这一集成系统的核心部件。至于全光子技术在信息高技术领域的应用与发展，还需长期深入的探索。

3.2 光子技术的特点

作为支撑当今和未来信息技术两大微观信息载体的电子和光子，除了具有承载信息的共性之外，它们还有各自的个性。例如，光子属于波色子，不带电荷，不易发生交互作用，因此光束可以互不影响；光子在真空中的运行速度为光速，不受 R_c 时限制；光子的时空特性使之能形成前向和后向共轭波，补畸变和失真等。这此特性反映在信息技术上，可归纳有响应速度快、传输容量大、存储密度高和便于微

型化和集成化等突出特点。

1. 响应速度快

目前电子器件及其系统的响应时间最快达10^{-9}秒，即ns量级，这几乎达到了固有极限，突破这个极限是不可能的。而由测不准关系得知，光子的响应时间可达10^{-15}秒，即fs量级，比电子器件快6个数量级。显然，这一点在未来信息时代的各种关键技术中将发挥出巨大作用，尤其是在计算机技术中将会促成根本性变革。1990年世界第一台数字光处理机光开关速度达到每秒10亿次。这种高速度运转及其并行处理特征为其发展和应用展示出一个十分诱人的前景。

2. 传输容量大

光子技术的信息传输容量大，这一优异特性已在现代光通信中得以充分体现。在一定意义上讲，近十年中光纤通信技术的迅猛发展就是光子技术所促成的。有人估计，光纤通信的主干线在世界上每年以百万千米的速度向前延伸。目前已完成了从第一代0.85μm波段多模光纤、第二代1.3μm波段零色散与单模光纤向第三代1.5μm波段低损耗色散位移单模光纤的换代与开发。传输容量从1978年的10Gbt/s·km以每年10倍的速度增长，到1986年已达1Tbt/s·km。在传输模式上已打破常规的IM/DD（强度调制/直接检测）方式，相继推出了相干光通信、复用光通信、光孤子通信及量子通信等等。特别是近年来在光纤放大技术上的突破，使光孤子通信变成了现实，开创了目前最前沿的传输系统，为全光和最终实现无限距离的超高速通信带来了希望。量子通信又称为光子通信，它是一种全新的通信系统。理论已经证明，一个光子在室温下可以携载近30bt的信息量，如果在低温下，这个数值将随温度的下降以指数形式增加，从而达到无限值。因此可以讲，光子通信有望借助一个光子将无穷多个信息传送给无穷多个

受信者。这将使光子学在通信领域的优势得以充分地发挥。

3. 存储密度高

光子技术在信息领域的存储潜力令人刮目相看。近年来光存储技术有了长足进展，光盘以其数据存储密度高、误码率低、可靠性好以及适应性强等诸多优点而受到青睐。现在一张 Φ200mm 的双面光盘，其厚度不超过 2.4mm，竟可存储二部电影的全部声像信息。随着可擦除大容量光盘的普及，价格低廉、复制方便的光盘将格外受到人们的重视。特别是全光光盘一经问世就立即较之磁光光盘显示出无比的优越性。科学家们预计，光盘将在众多种存储器中占据优势，成为 21 世纪继汽车、电视、微机之后又一项令人关注的重要发明。特别值得提到的是，利用光子学方式可能实现的三维立体存储，其容量之大，令人惊叹不已，一旦关键技术取得突破，其无与伦比的优势便会即刻显露出来。

4. 微型化和集成化

20 世纪 40 年代是第一代微光子技术趋于成熟的时期。这一领域涉及到梯度折射率光学、二元光学、纤维光学等许多分支。已研究出的许多元器件，包括自聚焦微透镜阵列、光纤面板与微通道板、软 X 射线光刻及光互连用微小光学器件阵列等，真是五光十色。另外，在有元器件方面，仅就信息处理单元来说，其元件的微小程度已远远小于集成电路中的电子元件。例如，单量子阱激光器及量子点处理元件的尺寸均在十分之一微米以下。微光子技术的发展与现已成熟的微电子技术相结合，有可能开拓出新一代更高水平的信息技术。

光子集成（PIC）形成于 20 世纪 80 年代后期，其特点是可将有源光电子器件，如半导体激光器、光放大器、光探测器等，与光波导器件，如分/合波器、耦合器、滤波器、调制器、开关等，集成在一块半导体芯片上，构成一种新的全光功能器件。这从根

本上改变了集成光学和光电子集成中有源无源器件分别集成后再用光纤连接的弊端，进而使器件在体积、功耗等诸多方面更具有竞争能力。正因如此，和电子学一样，光子集成也是光子技术发展的必然趋势。

3.3　集成光子学的发展

微电子学的结构主要包括三大部分。即用于模拟操作和伺服系统的线性集成，亦称为纵向集成或功能集成；用于数字运算、交换、存储如逻辑门阵列，主要是二维面阵；用于集成系统元件和回路间电学连接的集成互连布线及多层布线等。类似微电子学的发展，集成电子学同样必须具备三大结构。经过近 20 年的努力，由于光子集成基础技术的突破，上述三大结构的研究业已取得了实质性进展。

下面将对这三方面的发展分别予以介绍。

1. 光子功能集成回路

一座现代化的雄伟大厦是由许多预制模块根据设计的蓝图构成的，光子集成也是一样。

光子集成的基本单元包括诸如激光器（LD）与光子探测器（PD）、激光器与调制器（MO）、光开关（OS）、激光器和放大器（OA）、光放大器与光子探测器、激光器以及探测器与光波导（WG）和光栅（GR）等集成单元。目前这种光子功能集成回路的典型代表为：

（1）波分复用超大容量传输 PIC 激光发射器

当代信息高速公路多媒体通信的发展，要求它既要能传输巨大的信息容量，同时还要组成诸多的交叉网络。这就要求荷载信息的激光光源具有高速率和低噪声运行的能力，同时还要有在相当宽的动态范围内保证足够好的线性度和一定的输出功率。

分布反馈激光器（DFB）在高频运行时，由于受到啁啾频移噪声干扰的局限，一般只能在5Gbt/s以下工作。外调制技术的采用不难得到100Gbt/s的运行速率。

高速率光信息流进入网络后，还要分成许多子回路传输与交换。比如一条多媒体传输的光纤干线，通过交换网络之后可能被分成100条子路，于是为了满足高保真度的需要，必须保证主激光源的功率输出在50mW以上，这个要求也是一般DFB激光器难以达到的。

因此，激光器与光功率放大器的集成势在必行。光功率放大器有很好的保真度，同时又有很大的光学带宽，可以实时放大10个波长以上的输入光功率，因而为高密集波分复用超大容量传输奠定了基础。

美国现已研制成10路波分复用PIC激光发射器。每条路传输10Gbt/s容量，则单信道可传输的总容量为100Gbt/s。

这种集成光发射器由10个量子阱DBR激光器组成，每个激光器分别与一个量子阱电光调制器集成，然后通过光波导的导引进入汇集波导后，再与一个量子阱光放大器集成。通过对每个布拉格光栅注入电流的控制，调谐每个激光器的波长，因而由光放大器输出耦合到光纤中传输的激光包含了10个不同的波长频道。

这种典型的光电子集成回路，预计两三年后将会用到超大容量传输的工程系统中，可以认为这是光子功能集成的一项重大突破，它对信息高速公路的发展将起到有力的推动作用。

（2）外差PIC光接收机

光频外差接收机不仅是将来超长距离主干线相干光传输的关键部件，同时作为一种光频高灵敏接收技术，将广泛用于一切高精度光波检测与自动化控制技术领域。

光波外差接收技术工作原理类同于电波外差接收技术。主要

包括一个作为本地光频振荡的量子阱可调谐 DBR 激光器，一个 3dB 定向耦合器和两个量子阱光波导检测器以及导引传输光波导等。被检测的入射光通过低损耗埋层光波导引入本地振荡光波在 3dB 耦合器中实现光波拍频，而后由两个波导检测器分别取出光频和差频光信号，最后通过对差频信号进行检波解调，可高灵敏度获取载波光传递的信息。

2. 光子面阵集成

光子面阵集成是由同一类光子器件按系统要求分布重复地大规模集成在一块芯片上并组成矩阵式结构的。为满足光子信息的实时处理与交换功能的需要，光子面阵集成将向超大规模方向发展。

目前这种光子面阵集成主要有光逻辑门面阵与激光器面阵。

（1）高密度自电光效应器件（SEED）光双稳开关集成面阵

SEED 器件是一种无腔面的光双稳态开关器件，它是一个以超晶格为吸收区的简单 PIN 二极管，在反偏电场下通过量子阱中激子的可饱和吸收效应，实现光双稳态的操作。这种光功耗极低的无腔面器件，特别适合于发展大规模集成面阵，尤其是近年来发展的对称反射式 SR-SEED 器件，更便于集成化的发展。

SR-SEED 面阵可对光信息进行多路实时交换和二维信息处理，它为发展光逻辑运算的光计算技术打下了坚实的基础。SEED 集成面阵的成功将会使光信息处理技术由模拟阶段进入数字化阶段。同时人们希望进一步开发光学变换物理效应、全息技术及光波互不干扰特性等，从而实现光学并行处理功能，进一步促进光计算机的尽快飞跃。

（2）高密度垂直腔面发射激光器（VCSEL）集成面阵

亚毫安级垂直腔面发射激光器的研制成功，为高密度激光器集成面阵的发展奠定了关键的技术基础。这种集成面阵是发展二

维光信息实时处理和图形识别技术的关键硬件，必将得到广泛应用。

目前人们已成功地实现了 32×64 位的 VCSEL 面阵，每个激光器腔面为 $10\times10\mu m^2$，阈值电流为 0.5mA。如果将腔面缩小到 $1\mu m^2$，那么阈值可相应减小到 5μA。由于微细加工技术的进步，研制 $\phi0.5\mu m$ 腔面的微腔激光器已成为现实。只要突破降低串联电阻问题，阈值还可以进一步降低，从而对 1M 位的 VCSEL 面阵来说，其功耗可望降到 1W 量级。

(3) 光子集成互连布线

光互连技术类同于电子芯片中的集成布线。光互连不仅为光子芯片及光学逻辑元之间的运行连接所必需，同时也可替代微电子芯片与电子逻辑元之间的运行连接。

光互连不仅可以克服电互连存在的阻塞效应，同时还由于不同源点发出的光互不干扰，而且在波导内或自由空间传输时也不互相串扰，因此互连密度可以大大提高，并可实现三维互连系统。

大规模光互连技术的发展，要求对每个逻辑操作单元都配置有发射光源与光子探测器件，并组成一定规模的面阵。

神经网络计算技术将是发展人工智能的重要组成部分，诸多的神经单元如何实现互不干扰的高密度交叉互连，这对于微电子技术难度极大，而光互连却提供了易行的途径。比如在大规模神经网络芯片上对每个神经操作单元集成上 VCSEL+PD，那么通过计算机预先设计好的全息反射板能使由某一神经元发出的信息束，经全息反射后形成与各神经单元一一对应的光斑阵列。每一反射束被 PD 检测器所接收并转变为电信号，从而实现了互不干扰的高密度交叉光互连。互连密度的增大将使神经网络计算技术的功能与人脑联想对比功能更为接近。正因如此，光互连技术才为下一代超高速计算机和超大容量、超高速数据通信的发展所必

需，而受到极大的关注。

（4）光子集成与电子集成

光子的产生来源于电能的激励，光在半导体内运行的功能操作来自于半导体材料中的各种光电效应。因而离开了电的操作，光子器件的功能也得不到发挥，所以一些实用化光子集成芯片必须配之相应的电子集成回路。未来的大型集成系统也必然是光子集成与微电子集成的综合统一体，即光电子集成。其中光子集成芯片将成为这种光电子集成系统的心脏，它不但开拓了微电子集成系统的运行功能，同时也解决了一些微电子集成所无法解决的难题。

对光电子集成的基础研究，重点是以Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体材料为主，研制可与光子器件兼容的高速电子器件，并组成简单的集成单元。其典型代表是 20 世纪 90 年代初美国 IBM 公司报道的 8 000 个 MESFET 与 4 个 MSM 光子探测器所组成的用于多路信息处理的光电子集成芯片。

随着光子技术应用的发展，各种各样的光电子集成芯片不断问世，然而由于在Ⅲ-Ⅴ族基片上制造大规模电子集成回路还不很成熟，造价也太高，所以难以进入市场。因而近年来人们又开始探索在 Si 基材料上发展集成光电子学，其关键问题是能否成功地发展 Si 基高效发光或激光器件。而应变层能带工程和纳米技术的发展为这一长久的冷门课题带来了新的生机，人们正密切关注着这方面的新进展。

$Si_{1-x}Ge_x$/Si 应变层量子阱结构材料能够克服 Ge 与 Si 晶格严重失配的限制，在临界厚度内制备出完美的量子阱材料。注入到量子阱中的电子和空穴，受到阱壁限制形成了强的局域化自由激子，这种强局域化激子的复合，根据测不准关系，放宽了 K 的选择定则，因而 $Si_{1-x}Ge_x$/Si 量子阱材料的发光效率得到了很大的

提高，现已在10K下观察到主导的无声子参与的NP发光峰的发射。通过材料品质的提高和器件结构的优化，已有可能做出高效率的LED器件。

量子线结构将使激子局限化程度再增加一维限制，因而发光效率将会进一步提高，很有可能在高密度注入条件下获得激光振荡。

一旦在$Si_{1-x}Ge_x$/Si量子阱材料中获得激光振荡，垂直腔面发射器件技术就将会被引入到Si基材料上，从而有可能探索成功低损耗Si基微腔激光器。Si基微腔激光器的实现将在半导体科学技术领域产生巨大震动，人们梦寐以求的Si基光电子学时代即将来临。

最近，美国贝尔实验室又发表了一个振奋人心的消息。他们在AlInAs/InAs系量子阱结构材料中，实现了带内跃迁产生的红外激光发射，这种器件被称之为级联式激光器(Cascade)。这种激光器的基本原理归因于相邻量子阱导带内子能级间电子反转分布的存在。因为这种激光发射工作机制完全不依赖于带间复合跃迁，所以如能用Si与某种高带隙材料组成这种联级式量子阱结构，那么也完全可能在间接带隙结构Si基材料上做出激光器来。我们有理由相信，这一把光子集成技术和电子集成技术融合到一起的微光电子学时代迟早会到来。

第四章　信息技术将给社会带来巨大的变化

当蒸汽机首次出现在18世纪时，没有人梦想这一奇特的发明会横扫社会生活的每一个角落，并且发展成为历史上的工业革命。然而今天我们不会怀疑这场新的信息革命给人类生活带来的影响

会比工业革命更加深刻。

4.1　光纤到户与电脑微型化

光纤到户使全世界每个家庭都成为全球信息网络的一个成员，每个人都拥有这个网络。电脑微型化又使网络终端深入到世界每个角落，无论身在何处，人们都可以随时利用便携式电话机相互通话，比如你在高空航行的飞机上可不时与潜入海底的朋友聊天。

电脑不仅是信息的收发器，而且它还会成功地帮助你管理家庭，比如电气负载开关、环境控制、能量及安全管理等。

设想一个多功能的家庭电脑系统，它不仅可能动地处理各种信息与业务，而且通过电气负载开关功能可以进行照明和电气装置控制。从而既可提供居室、客房、车库等各区域温度等舒适的环境条件，又能保证最低能量消耗。各房间的烟火检测器和移动检测器可及时报警并准确地通知消防或保安机关，主人可按自己的意愿通过键盘控制所有门的开或关。

也有人预测，多功能信息芯片可植入人体，充当信用卡、护照、驾驶证、身份证及个人日记等，这些都可以随你选定。这一芯片如配有植入人体的微型机器，则可修复肌肉和脑细胞等，它不但能提高智力还能永葆青春。

4.2　电子教育

信息网络通过计算机卫星、光纤等先进技术，把世界各国的学生、教授、研究人员等连接起来，构成全球大学。学生不需也许没有必要呆在大学校园里。多数学生可听到电视屏幕上教授生动活泼的讲解，各自按自己的进度学习，从而有更多的时间参加有助于自己发展的活动。当然教师还是不可缺少的，不过，其主

导作用将是指导、监督和讨论。

电子教育既使儿童受益也使成年人得利。这种交互式教育可从婴儿时期开始，特别是有些设备很适合摇篮、童床和围栏等。玩电子游戏能有效地促进早期发育 。

丰富的信息资源使学历和职业资历变得不那么重要。因为人们可利用信息库不断加强自我教育，如果你停止学习，你就会马上失去竞争的能力。

4.3 电子通勤

交互式网络系统可使电子通勤人数与日俱增。律师、广告经纪人、股票经纪人、销售代理人及其他专业人员可以在家或郊外办公，因为他们能随时随地掌握想要知道的一切信息，也能处理想要做的一切工作。

由于电子通勤可以不用到很远的工厂或办公室上班，农村地区和旅游胜地可能日渐繁荣。因为人们将自由地选择自然环境优越、文化气息浓厚、生活费用适中的地区居住，不受上班的拖累。

除家庭办公室外还可以有汽车办公室。尽管人们在家的工作时间会越来越长，但是人们更希望在旅行中也能工作。为此，就必须把计算机、电视机、睡椅、冰箱等生活和办公用品集中到汽车上。

随时随地办公的结果，使得摩天大楼变得不那么重要了。因为摩天大楼是工商界人士需要互相接近、便于通信和管理而开发的。电子邮件、传真和价格便宜的电话等没有理由不使一些大公司把总部设在环境幽静的郊外。

4.4 信息市场与购物

国际信息网存储的大量信息使人们见多识广，而且大部分服

务是免费或收费很少的。但随着信息量的不断增加，收费信息也会越来越多。因为信息提供者要花高价收集信息，如果他们不能从广告商或其他赞助商那里获得足够多的收入，那么就要向信息使用者收费，于是便会出现信息市场。

信息提供无数的可能性，如果有效地利用它会给生产率和盈利带来惊人的飞跃。

电子购物可利用计算机及大量信息帮助人们决策。比如你想出去吃饭，你就可以告诉计算机你打算驱车多远，想吃什么，大约要花多少钱，于是计算机可列出满足你标准的餐馆名单任你选择。相信用计算机决策瞬息万变的股票、金融和商品交易日子的到来也只是时间问题。

纵览电子技术的发展，可以说 20 世纪送给 21 世纪的最好礼物就是以激光、光纤、计算机为支柱的全球数字信息网络。这是迄今人类建造的最大的机器，生活在地球上的每个人都拥有这台机器、利用这台机器、受益于这台机器，我们更要努力驾驭这个庞然大物，迎接新的挑战，创造更高层次的世界文明。

参 考 文 献

1.《无线电 60 年》:[前苏]А·Л·福德图森科 Н·А·普苏德柴夫等著,上海科学技术出版社 1959 年版。

2.《电子工业技术发展简史》:叶钟灵编写,山西人民出版社 1983 年版。

3.《天线与电波传播》:董维仁、王华芝、云大年编,科学出版社 1990 版。

4.《天线》:Н·А·多布罗夫斯基著,人民邮电出版社 1957 年版。

5.《天线》:杨思耀 杜加聪编,电子工业出版社 1984 年版。

6.《电视》:格拉德科夫著,万永熙、元禾合译,中国青年出版社 1957 年版。

7. 子学 50 年史和 21 世纪展望,日經电子学,日經マグロウヒル社,1980(エレクトロニクス50 年史と21 世紀への展望,日經エレクトロニクス,日經マグロウヒル社,1980)。

8. 微电路是怎样诞生的,切尔诺朱保夫,ю·с. 莫斯科《教育》出版社,1989(как рождаются микросхеиы, ю. с. тернозуьов, Москва《Просвещение》, 1989)。

9. 超 LSI 入门,太田邦一,欧姆社,1983(超 LSI 入门,太田邦一,オーム社,1983)。

10. 化合物半导体器件,日本产业技术振兴协会新材料技术委员会编,东京印刷中心,1973(化合物半導体デバイス,日本産業技術振興協会新材料技術委員会編,東京印刷センター。

11. 现代固体电子学,田中哲郎著,电气书院,1970(近代固体電子学,田中哲郎著,電呉書院,1970)。

12.《计算机发展史》:[前苏]Н·А·阿波京、Л·Е·梅斯特洛夫著,上海科学技术出版社 1984 年版。

13.《计算机发展简史》：陈厚云　王行刚等编著，科学出版社 1985 年版。
14.《电子科学发明家》：松鹰著，中国青年出版社 1981 年版。
15.《电子发明》：G・W・A・达墨编，李超云　郑文浩　冯义谦编译，科学出版社 1985 年版。
16.《今日电子技术》：丘复云　籍长国　苑宝纯等编著，科学出版社 1990 年版。
17. 電波工学研究の動向，文部省科学研究員補助金特定研究（1）学術研究動向の调查研究電波工学班调查報告書. No. 2. 1983 年 3 月。
18. メーザとレーザの発明. 霜田光一，電子通信学会迹，Vol. 62. No. 2，1979 年。
19. 激光与光电子技术，中国科学技术协会主编，上海科学技术出版社，1994 年。
20. 電子デイスプレイ，小林駿介编著，社团法人電子情報通信学会，1992 年。
21. 光エネルギー塌送のインパクト，森川忆太郎，エレクトロニクス，1993 年 4 月号。
22. 青色発光ダイオド，タブルヘテロ構造で 1cd 实现，中村修二，日經エレクトロニクス，602 期，1994 年。
23. 光フーイバ通信入門，末松安晴，伊贺健一，オーム社，1982 年。
24. 超高速光導電スイツチの目ざすもの，板谷太郎，エレクトロニクス，1965 年。
25. 記錄密度在 1ケタ以上向上させる波長多重記錄材料とは？清水直樹，エレクトロニクス，1995 年 1 月号。
26.“光テープ記錄”ベテうバイトを目ぢす，德丸春樹，エレクトロニクス. 1995 年 11 月号。
27. 反强誘電性液晶のインパクト，鈴木義一等，エレクトロニクス，1993 年 4 月号。
28. オプトエレクトロニクス，西澤潤一，共立出版株式会社，1977 年。
29. 発光ダイオートとその应用，西澤潤一監修，産業圖書，1991 年。

30. Researchers Look to Brighter Future for LEDs. Yasuo Idei, Display Devicess' 92。

31. LEDs: Casting Light on Information at Home, Work and Outdoors, Haruki Ogawa, Display Devices 91, No. 1。

32. Trends in LED Development and Display Application Technology, Norio Fujimura, Display Device 90 No. 2。

[General Information]
info：本信息由Onlyown终结版生成
图书名：世界电子科学史
SS：12030959
页码：438
本书总页数：452
BookUrl：http://book.szdnet.org.cn/views/specific/2929/bookDetail.jsp?dxNumber=000006377407&d=A683E2F49630D587E5C29B61CA1CCA75&fenlei=1816#ctop
Str：/img15/141AF70B92FE470CB61103FAFD2C5EFFDAA94DEE2FF7B91894DD896278AD919BA8FB874EC353AA5667623BB6D5EB88B9DF01F615E71B9C66EFD00D9D2DC70A28FBBC82D56DFA20203AE6E03F94F9070750B3FCE29D48E2E7124FEF4F9E3BD05CB7710340D9A13C203E8E968E029854828377/b59/